

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Božo Renić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Ćorić, dipl. ing.

Student:

Božo Renić

Zagreb, 2019.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem se svom mentoru prof.dr.sc. Danku Ćoriću, asistentu Matiji Sakomanu, asistentu Draženu Mediću te tehničkom suradniku Ivanu Vovku na pomoći i vremenu koje su mi posvetili prilikom izrade ovog rada. Hvala mojoj obitelji i prijateljima koji su mi uvijek bili podrška tijekom studija. Najviše hvala dragom Bogu koji mi je dao zdravlja i motivacije da završim ovaj studij.*

Božo Renić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **BOŽO RENIĆ** Mat. br.: 0035200484

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Adhezijska otpornost tvrdih metala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The adhesion resistance of cemented carbides**

Opis zadatka:

Tvrdi metal je jedan od najpoznatijih predstavnika materijala koju se dobivaju postupkom metalurgije praha. Struktura tvrdog metala sastoji od karbida volframa te karbida titanija i tantala povezanih kobaltom kao vezivom. Kobalt daje žilavost, a karbidi su nositelji tvrdoće i otpornosti na trošenje. Izrazito visoka tvrdoća ovog materijala koja se kreće u rasponu od 700 HV30 pa sve do 2200 HV30, velikim dijelom utječe na njegovu primjenu u izradi reznih alata za obradu metala.

U radu je potrebno napraviti sljedeće:

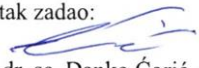
- opisati postupak proizvodnje tvrdog metala
- istaknuti najvažnija svojstva i mogućnosti primjene
- opisati mehanizme trošenja reznih alata s naglaskom na adheziji i formiranju naljepka na tvrdom metalu
- navesti laboratorijske metode ispitivanja adhezije
- provesti ispitivanja adhezijskog trošenja na raspoloživim uzorcima tvrdog metala
- statistički obraditi dobivene rezultate
- analizirati rezultate i donijeti odgovarajuće zaključke.


U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:  
28. studenog 2019.

Predviđeni datum obrane:  
04. prosinca 2019.  
05. prosinca 2019.  
06. prosinca 2019.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Danko Čorić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1 UVOD .....	1
2 POSTUPAK PROIZVODNJE TVRDIH METALA .....	3
2.1 Proizvodnja, miješanje i mljevenje praha.....	4
2.2 Kompaktiranje i sinteriranje praha .....	7
3 MEHANIČKA SVOJSTVA TVRDIH METALA I NJIHOVA PRIMJENA .....	12
4 MEHANIZMI TROŠENJA REZNOG ALATA OD TVRDOG METALA.....	16
4.1 Adhezija i formiranje naljepka na tvrdom metalu.....	18
4.1.1 Fenomen formiranja stopala.....	21
4.2 Abrazija .....	24
4.3 Zamor površine .....	26
4.4 Oksidacija.....	27
4.5 Difuzija.....	27
5 LABORATORIJSKE METODE ISPITIVANJA ADHEZIJE.....	29
5.1 Metoda „prizma po prstenu“ .....	29
5.2 Metoda „četiri kuglice“ .....	30
5.3 Metoda „kuglica po disku“ .....	31
5.4 Metoda „valjčić po disku“ .....	32
5.5 Metoda „kuglica po ploči“ .....	33

6	EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE TVRDIH METALA .....	34
6.1	Priprema uzoraka i ispitna metoda .....	34
6.2	Ispitivanje adhezijskog trošenja .....	36
6.3.	Metalogrfska priprema prstena .....	46
6.4.	Mjerenje tvrdoće prstena .....	47
	ZAKLJUČAK .....	51
	LITERATURA .....	52
	PRILOZI.....	55

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Mikrostruktura WC-Co tvrdog metala [1] .....	2
Slika 2.1. Vodena atomizacija [5] .....	5
Slika 2.2. Postupak kugličnog mljevenja [8].....	6
Slika 2.3. Hladno prešanje u kalupu [10] .....	7
Slika 2.4. Postupak hladnog izostatičkog prešanja [12] .....	8
Slika 2.5. Dijagram postupka sinteriranja [13] .....	9
Slika 2.6. Rast zrna tijekom procesa sinteriranja u rastaljenoj fazi [14] .....	10
Slika 2.7. Sinter/HIP postupak proizvodnje WC-Co tvrdih metala [15].....	11
Slika 3.1. Utjecaj veličine zrna i udjela kobalta na tvrdoću i lomnu žilavost [2].....	12
Slika 3.2. Ovisnost otpornosti na trošenje i žilavosti za različite skupine materijala [1].....	13
Slika 3.3. Pločica od tvrdog metala noža za tokarenje [17] .....	14
Slika 3.4. Pločice tvrdog metala na glodalima [18] .....	14
Slika 3.5. Rezne pločice pile za rezanje [19] .....	15
Slika 4.1. Dominantni mehanizmi trošenja i raspodjela temperature na alatu i obratku [22]..	17
Slika 4.2. Proces adhezijskog trošenja [24].....	18
Slika 4.3. Dvije mogućnosti loma (1 i 2) tijekom smicanja [23] .....	18
Slika 4.4. Adhezijsko trošenje alata od tvrdog metala kod obrade TiAl6V4 legure [20] .....	20
Slika 4.5. SEM slike oštice tvrdo-metalnog reznog alata nakon obrade Al-legure [20].....	21
Slika 4.6. Formiranje strugotine u obliku stopala prilikom izlaska alata iz obratka [20] .....	22
Slika 4.7. Shematski prikaz abrazijskog trošenja [29] .....	24
Slika 4.8. Površina WC-Co tvrdog metala s 20% Co nakon provednog testa brazdanja [31] .	25
Slika 4.9. Wöhlerov dijagram za tvrde metale i ostale cermete [32] .....	26
Slika 4.10. Mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata od tvrdog metala [37] .....	28
Slika 5.1. Metoda ispitivanja „prizma po prstenu“ [39].....	29
Slika 5.2. Metoda ispitivanja „četiri kuglice“ [40].....	30
Slika 5.3. Metoda ispitivanja „kuglica po disku“ [41] .....	31
Slika 5.4. Metoda ispitivanja „valjčić po disku“ [42] .....	32
Slika 5.5. Metoda ispitivanja „kuglica po ploči“ [43].....	33
Slika 6.1. Uzorak tvrdog metala s 5 % kobalta .....	34
Slika 6.2. Izrezani uzorak WC-15Co .....	35
Slika 6.3. Metoda prizma po prstenu uz primjenu računala .....	36

Slika 6.4. Sučelje programa WFS210 .....	37
Slika 6.5. Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-5Co.....	39
Slika 6.6. Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-10Co.....	39
Slika 6.7. Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-15Co.....	40
Slika 6.8. Usporedba sile trenja za sva tri uzorka .....	41
Slika 6.9. Ovisnost sile trenja o udjelu kobalta .....	42
Slika 6.10. Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-5Co .....	42
Slika 6.11. Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-10Co .....	43
Slika 6.12. Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-15Co .....	43
Slika 6.13. Usporedba faktora trenja za sva tri uzorka.....	44
Slika 6.14. Ovisnost faktora trenja o udjelu kobalta .....	45
Slika 6.15. Uzorak prstena zaliven u polimernu masu .....	46
Slika 6.16. Tvrdomjer Indentec .....	47
Slika 6.17. Optički mikroskop.....	48
Slika 6.18. Otisak piramide Vickersovog indentora .....	49



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Srednja vrijednost, minimum, maksimum i standardno odstupanje sile trenja.....	41
Tablica 2. Srednja vrijednost, minimum, maksimum i standardno odstupanje faktora trenja..	45
Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće na prstenu .....	49

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$c$	-	Konstanta opruge
$d$	mm	Duljina dijagonale otiska
$d_{sr}$	mm	Srednja vrijednost dijagonala
$E$	GPa	Youngov modul elastičnosti
$f$	Hz	Frekvencija
$F$	N	Ispitna sila
$F_N$	N	Normalna sila
$F_{tr}$	N	Sila trenja
$HV$	-	Tvrdoća po Vickersu
$K_{IC}$	MPa $\cdot\sqrt{m}$	Lomna žilavost
$R_d$	N/mm <sup>2</sup>	Dinamička izdržljivost
$R_{ms}$	N/mm <sup>2</sup>	Savojna čvrstoća
$R_{mt}$	N/mm <sup>2</sup>	Tlačna čvrstoća
$S$	mm	Udaljenost mete od senzora
$S_{max}$	mm	Maksimalna udaljenost mete
$S_{trenutni}$	mm	Trenutna udaljenost mete
$U$	V	Napon
$u$	mm	Pomak
$\mu$	-	Faktor trenja

## SAŽETAK

U ovom radu opisani su WC-Co tvrdi metali, njihova proizvodnja, povoljna mehanička svojstva i primjena u industriji. Budući da je njihova primjena u obliku reznih alata široko rasprostranjena, opisani su i najčešći oblici trošenja s naglaskom na adheziju i formiranje naljepka (engl. *Built-up edge*). U eksperimentalnom dijelu ispitivana je adhezijska otpornost tvrdih metala. Ispitivanja adhezijske otpornosti provedena su na tri uzorka: s 5% kobalta (WC-5Co), 10% kobalta (WC-10Co) i 15% kobalta (WC-15Co), metodom prizma po prstenu (engl. „*block on ring*“) uz pomoć računala sukladno normi ASTM G77. Mjeren je faktor trenja kod sva 3 uzorka i rezultati pokazuju kako se on raste s povećanjem udjela kobalta u tvrdom metalu. Kao protupar se koristio prsten od čelika za ležajeve oznake 100Cr6. Za potrebe ispitivanja provedena je karakterizacija ovog prstena mjerenjem tvrdoće.

Ključne riječi: tvrdi metal, adhezijska otpornost, faktor trenja

## **SUMMARY**

In this paper WC-Co hard metals are described, their production, favorable mechanical properties and industrial applications. Because their use in the form of cutting tools is widespread, the most common wear patterns with emphasis on adhesion and the formation of a Built-up Edge have been described. In the experimental part, the adhesion resistance of hard metals was investigated. The adhesion tests were performed on three samples: with 5% cobalt (WC-5Co), 10% cobalt (WC-10Co) and 15% cobalt (WC-15Co), using a computer-based method Block on ring in accordance with ASTM G77. The friction factor of all 3 samples was measured and the results show that it increases with the increase of the cobalt content in the hard metal. In this test, a 100Cr6 steel ring was used. For the purpose of testing, the characterization of this ring was performed by measuring the hardness.

Keywords: hard metal, adhesion resistance, friction factor

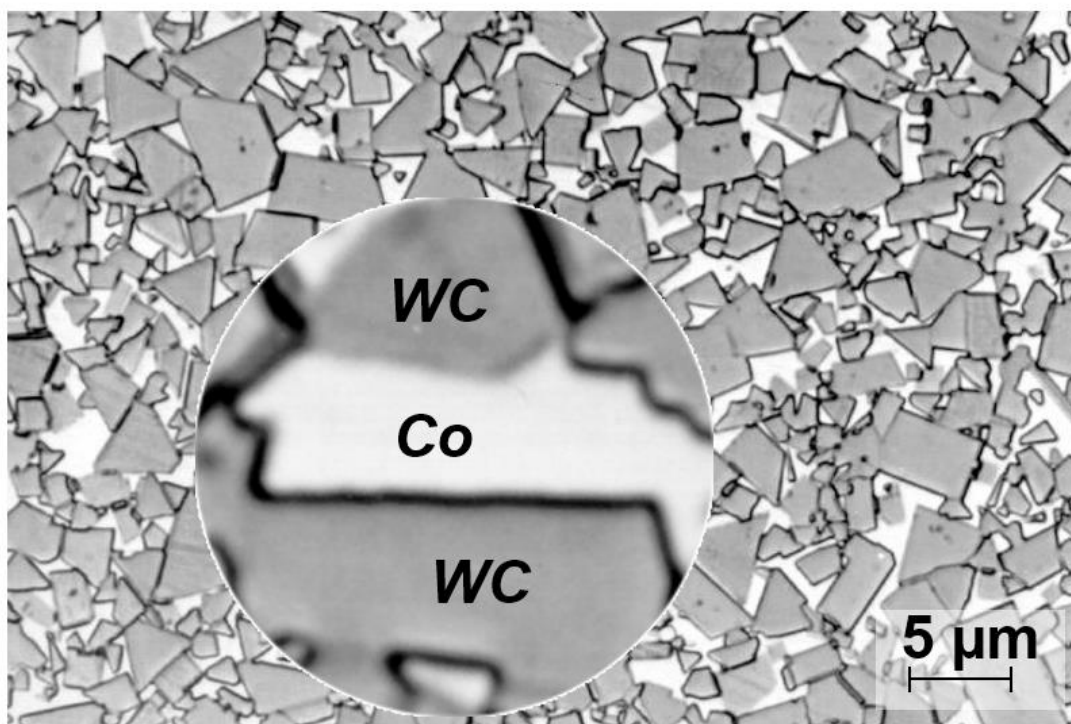
## 1 UVOD

Tvrđi metal je kompozitni materijal koji se dobiva postupkom metalurgije praha. Njegova se mikrostruktura sastoji se od karbida volframa (veći udio) te karbida titanija i tantala (manji udio) povezanih kobaltom koji čini vezivo. Kobalt ovom metalu daje žilavost, a karbidi volframa daju tvrdoću a time i otpornost na trošenje. Uz iznimno visok Youngov modul, volframov karbid se teško plastično deformira tijekom opterećenja. Ova kombinacija svojstava čini volframove karbide zanimljivim za različite primjene. Ta ogromna raznovrsnost primjene proizlazi iz činjenice da se svojstva WC i WC-Co tvrdog metala mogu mijenjati u širokom rasponu, zbog čega se volframovi karbidi mogu koristiti u područjima primjene s velikim savojnim i tlačnim opterećenjima. WC-Co tvrdi metali se koriste za rezanje metala, za obradu drva i kamena, za bušenje stijena i sl. Osim jednostavnih WC-Co sustava, postoje i oni s miješanim karbidima koji sadrže titanijeve, tantalove ili niobijeve karbide [1]. Važna svojstva tvrdog metala su: visoka tvrdoća, visoko talište, visoka otpornost na trošenje, visoka čvrstoća pri povišenim temperaturama, visoka tlačna čvrstoća, visoki modul elastičnosti, visoka toplinska vodljivost i otpornost na toplinske šokove, dobra otpornost na koroziju, visoka električna vodljivost [2]. Ova mehanička svojstva tvrdog metala proizlaze iz njegove mikrostrukture stoga je ona vrlo važna. Pri izradi tvrdog metala ona će ovisiti o raznim parametrima procesa. Ovisno o raspodjeli čestica praha i njihovoj veličini te procesu oblikovanja i sinteriranja, oblik zrna i veličina zrna mogu značajno varirati. U mikrostrukтури se često javljaju nepoželjni oblici kao što su slobodni ugljik, grafit i eta karbidi koji narušavaju mehanička svojstva [3].

90% tvrdih metala u svijetu je WC-Co sustava kod kojeg je udio kobalta između 3 i 30%. Razlog tome je odlična oblikovljivost kobalta tijekom miješanja i mljevenja te veća topivost karbida volframa u njemu. Tvrđi metali se najviše primjenjuju za izradu visokokvalitetnih reznih alata. Obradom pomoću takvih alata brzina rezanja je jako visoka te se dobiva površina visoke kvalitete. Pri takvim uvjetima i visokim temperaturama pokazuju bolja svojstva rezanja nego alati od brzoreznog čelika. Tome doprinosi visoka tvrdoća, odlična otpornost na trošenje i stabilnost pri povišenim temperaturama. Danas se u proizvodnji ovih metala primjenjuju prahovi koji imaju sve manje veličine zrna kao što su nanočestični prahovi ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ). Uporabom takvih prahova dobiva se mikrostruktura koja je homogenija, tvrđa, čvršća, a time i otpornija na trošenje. Ona omogućuje primjenu reznih alata pri većim brzinama te produžuje vijek trajanja reznog alata. Takav napredak proizvodnje prahova i općenito napredak postupaka

konsolidacije doveo je do toga da se metalurgija praha koristi u raznim područjima industrije [3]. Unatoč svim navedenim prednostima i kvalitetama tvrdih metala i kod njih su prisutni razni oblici trošenja pogotovo kod reznih alata.

Na slici 1.1. prikazana je mikrostruktura WC-Co tvrdog metala.



Slika 1.1. Mikrostruktura WC-Co tvrdog metala [1]

## 2 POSTUPAK PROIZVODNJE TVRDIH METALA

Za proizvodnju tvrdih metala koristi se postupak metalurgije praha. U uobičajenom postupku metalurgijom praha, prašak je kompaktiran (prešan) u željeni oblik i zatim se zagrijava (sinterira) kako bi se čestice povezale u čvrstu tvorevinu. Sva svojstva tvrdih metala, kao i svih metalurških proizvoda u prahu, reguliraju vrsta i čistoća primarnih sirovina koje se koriste u njihovoj proizvodnji. Primarni sastojci za proizvodnju WC-Co uključuju, na primjer, šelit ( $\text{CaWO}_4$ ) za karbidni prah i heterogenit za kobaltne prah. Danas se prahovi često proizvode od recikliranih tvrdih metala. Iako ispitivanja koja su proveli neki znanstvenici nisu otkrila velike razlike između svojstava tvrdih metala izrađenih od čistih i recikliranih sirovina, podaci o učinku obrade koji su izvijestili proizvođači alata dokazali su da postoje odstupanja. Koriste se različite tehnologije za pretvaranje prahova karbida i veziva u proizvode, koji stoga pokazuju raznovrsne karakteristike. Prahovi koji se koriste u tu svrhu dobivaju se proizvodnim metodama koje daju različite oblike i veličine čestica. Oni najčešće sadrže zrna male veličine i visoke su čistoće što je značajno za mikrostrukturu i mehanička svojstva alata i dijelova koji se proizvode. Ovi aspekti imaju utjecaja na sinteriranje i kemijsku reaktivnost praha. Potonje ovisi o broju unutarnjih oštećenja unutar čestica i njihovoj površinskoj energiji. Unutarnje manjkavosti uključuju uglavnom kristalografske točkaste defekte, tj. slobodna mjesta i intersticijske atome, te linijske defekte, tj. dislokacije. Da bi se dobili sinterirani proizvodi odgovarajuće gustoće i male poroznosti, trebaju se upotrijebiti prahovi s visokom sterilnom aktivnošću i velikom reaktivnošću. Jednom kada se prahovi proizvedu, klasificiraju i miješaju, oblikuju se i sinteriraju. Tehnologije pomoću kojih se postižu željeni oblici od tvrdog metala uključuju razne operacije oblikovanja, poput vrućeg izostatičkog prešanja i hladnog izostatičkog prešanja. Dijelovi praha također se mogu prethodno sinterirati tijekom tih operacija. Kompaktiranje se vrši u stroju za prešanje upotrebom specifičnog kalupa za dio koji će se proizvoditi. Nakon prešanja do željenog oblika slijedi sinteriranje. Sinteriranje služi u svrhu srašćivanja čestica praha i njihova spajanja metalnim vezama pri čemu isčezavaju pore i formiraju se granice zrna. To je omogućeno kapilarnim djelovanjem i dobrim ovlaživanjem karbidnim česticama vezivom. Sinteriranje se provodi na temperaturi ispod točke tališta glavnog konstituenta. Nakon završetka sinteriranja, proizvod je spreman za završnu obradu (brušenje) i, prema potrebi, se prevlači tankim prevlakama [4]. Metalurgijom praha nastaje vrlo malo otpadnog materijala te se oko 97% početnog praha pretvara u proizvod. Određeni materijali koje je teško proizvesti nekim drugim tehnologijama mogu se oblikovati metalurgijom praha kao što su WC-Co tvrdi

metali. Kod ovog postupka je bolja dimenzijska kontrola nego kod postupka lijevanja te se njime mogu proizvesti složeni dijelovi izrazito visoke kvalitete [2]. Nedostatci ovog postupka su: skup kalup za kompaktiranje, visoka cijena praha te otežano skladištenje i rukovanje, niža mehanička svojstva uslijed oksidacije i poroziteta, isplativo samo za proizvodnju u velikim serijama [3].

Postupak proizvodnje tvrdog metala provodi se u 4 faze:

- proizvodnja praha,
- miješanje i mljevenje praha,
- kompaktiranje praha u željeni oblik,
- sinteriranje.

## 2.1 Proizvodnja, miješanje i mljevenje praha

Prvi korak u cjelokupnom procesu metalurgije praha je proizvodnja metalnog praha. Četiri su postupka koja se koriste u proizvodnji praha: redukcija u čvrstom stanju, elektroliza, kemijski postupak i atomizacija [5].

Pri redukciji u čvrstom stanju, odabrana ruda je usitnjena, obično pomiješana s ugljikom i propušta se kroz kontinuiranu peć. U peći se odvija reakcija, pri kojoj se smanjuju ugljik i kisik iz komadića „spužvastog“ metala koji se potom drobi. Zatim se odvaja od svih nemetalnih materijala i prosijava kako bi se dobio prah. Kako se ne radi o rafiniranju, čistoća praha ovisi o čistoći sirovine. Nepravilne „spužvaste“ čestice metala su mekane, lako stisljive i daju (zelene) oblike dobre čvrstoće prije sinteriranja [5].

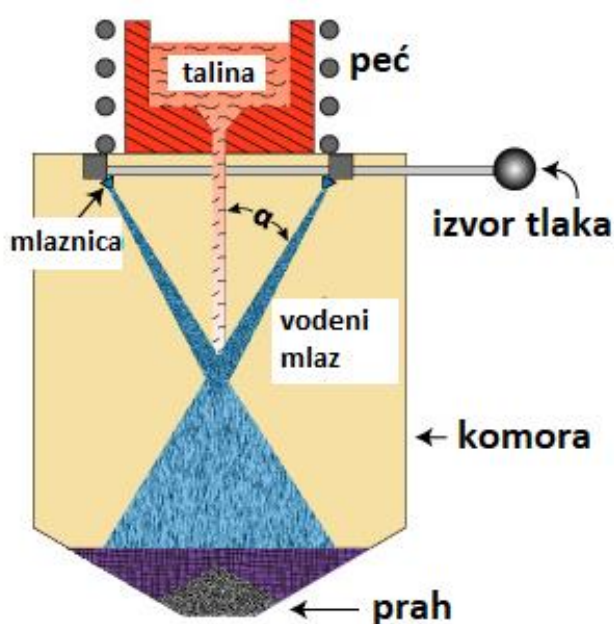
Odabirom pogodnih uvjeta, kao što su elektrolitni sastav i koncentracija, temperatura i gustoća struje, mnogi metali se mogu taložiti u spužvasto ili praškasto stanje. Daljnja obrada - pranje, sušenje, smanjivanje, žarenje i drobljenje - često je potrebna, da bi se u konačnici dobivao prah visoke čistoće i visoke gustoće. Bakar je primarni metal koji nastaje elektrolizom, ali prahovi željeza, kroma i magnezija također se proizvode na ovaj način. Zbog pridruženih visokih troškova energije, elektroliza je uglavnom ograničena na prahove visoke vrijednosti, poput visoko provodljivih bakrenih prahova [5].

Najčešći kemijski postupci za dobivanje praha uključuju redukciju oksida, taloženje iz otopina i toplinsko raspadanje. Proizvedeni prahovi mogu se jako razlikovati u svojstvima, a imaju usko



kontroliranu veličinu i oblik čestica. Prahovi s reduciranim oksidom često se opisuju kao "spužvasti", zbog pora prisutnih u pojedinim česticama. Prahovi koji se talože s otopinom mogu osigurati usku raspodjelu veličine čestica i visoku čistoću. Toplinska razgradnja najčešće se koristi za preradu karbonila. Ti prašci, jednom samljeveni, prelaze 99,5% čistoće [5].

Atomizacija najrašireniji postupak za proizvodnju metalnog praša. U tom se postupku rastaljeni metal razdvaja na male kapljice i brzo skrućuje prije nego što kapljice dođu u međusobni dodir ili padnu na čvrstu površinu. Obično se tanki tok rastaljenog metala raspada podvrgavajući ga utjecajima visokoenergetskih mlazova plina ili tekućine. U principu, tehnika je primjenjiva na sve metale koji se mogu rastaliti i komercijalno se koriste za proizvodnju željeza, bakra, legiranih čelika, mjedi, bronce, metala sa niskim talištem kao što su aluminij, kositar, olovo, cink i kadmij. Ovim postupkom se dobivaju i prašci materijala s visokim talištem kao što su volfram, titanij, renij što je važno za proizvodnju tvrdih metala. Na slici 2.1. prikazan je postupak vodene atomizacije [5].



Slika 2.1. Vodena atomizacija [5]

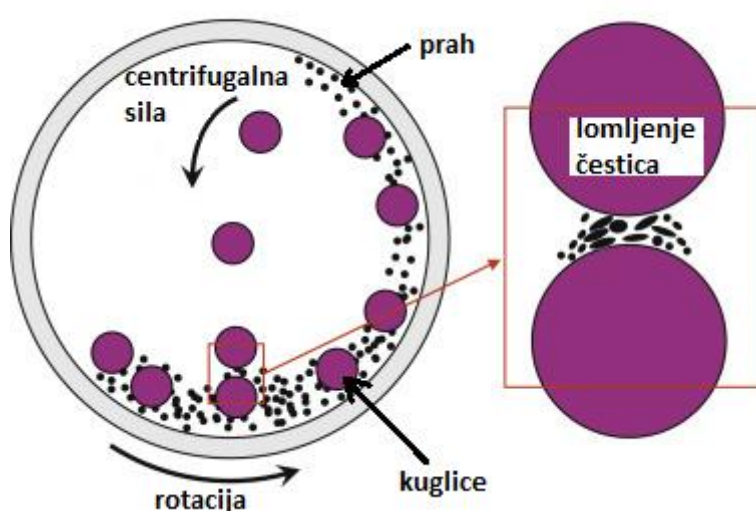
U procesu vodene atomizacije tok rastaljenog metala raspada se zbog višestrukih mlazova vode. Kut određuje učinkovitost atomizacije.

Miješanje sirovina u prahu, za kompaktiranje dijelova u postupku metalurgije praša, provodi se iz dva razloga. Prvi je dobivanje homogene smjese prašci različitih kemijskih sastava. Sirovine za kompaktiranje obično se sastoje od elementarnih mješavina kako bi se održala što

bolja razina stlačivosti. Korištenje ovog pristupa znači da se stlačivost kontrolira mekim, žarenim osnovnim prahom. Upotreba predlegiranog praha značila bi da se početna tvrdoća čestica povećava dodacima legiranih elemenata, a stlačivost se smanjuje.

Drugi razlog je korištenje maziva za kompaktiranje. Popularna maziva su stearinska kiselina, stearin, metalni stearati ili drugi organski spojevi. Svrha dodavanja maziva je smanjiti trenje (a samim time ostvariti jednoličnije gustoće) tijekom zbijanja, smanjiti sile izbacivanja i umanjiti tendenciju pucanja prilikom izbacivanja kompaktiranog oblika iz kalupa. Homogena mješavina se obično proizvodi od početnih sastojaka miješanjem u odgovarajućem miješalu. Miješala su često dvostruke konusne geometrije, ali koriste se i drugi oblici posuda (presjeci u obliku slova V, W ili Y) [6].

U slučaju tvrdih metala, mljevenje se najčešće vrši u kugličnom mlinu. Kuglični mlin sastoji se od šupljeg cilindričnog bubnja koji se okreće oko svoje osi. Osi bubnja mogu biti vodoravne ili pod malim kutom u odnosu na vodoravnu. Djelomično je ispunjen kuglicama. Medij za mljevenje su kuglice koje mogu biti izrađene od čelika (kromirani čelik), nehrđajućeg čelika, keramike, gume ili istog materijala kao što je prah. Unutarnja površina cilindričnog bubnja obično je obložena materijalom otpornim na abraziju, poput čelika legiranog manganom ili gume. U mlinovima s gumenim oblogama trošenje je manje. Duljina mlina je približno jednaka njegovom promjeru. Kako se bubanj rotira, kuglice se podižu na uzlaznoj strani, a zatim padaju (ili se spuštaju prema dolje), s vrha bubnja. Pri tome se čvrste čestice između kuglica i površine bubnja smanjuju uslijed udaraca [7]. Postupak kugličnog mljevenja prikazan je na slici 2.2.



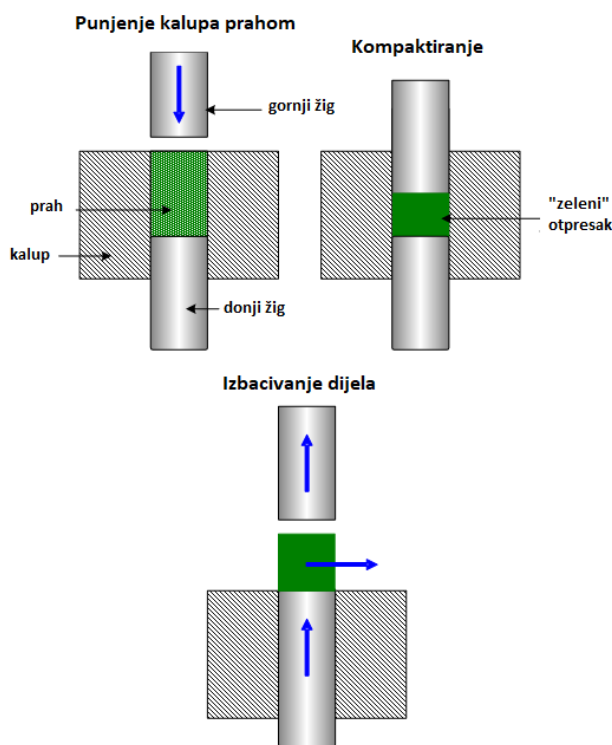
Slika 2.2. Postupak kugličnog mljevenja [8]

## 2.2 Kompaktiranje i sinteriranje praha

Kompaktiranje metalnih prahova ima sljedeće glavne funkcije:

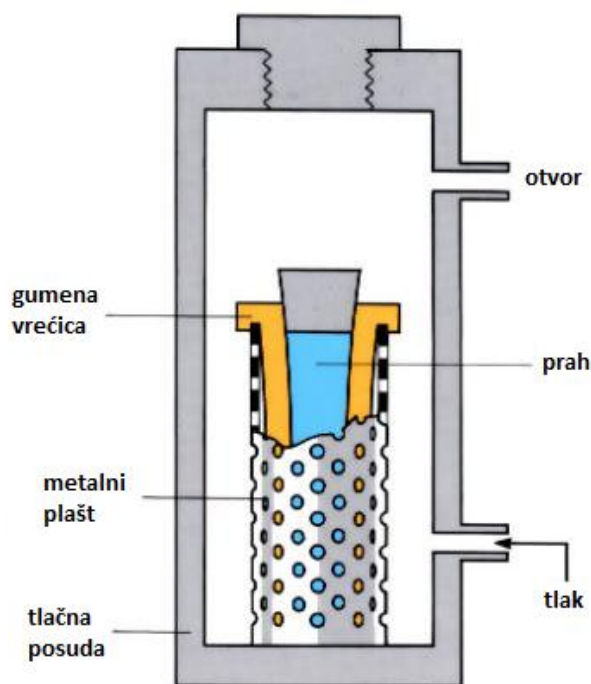
1. konsolidacija praha u željeni oblik,
2. postizanje konačnih dimenzija, uz uvažavanje skupljanja tijekom sinteriranja,
3. postizanje željenog stupnja i vrste poroznosti,
4. postizanje zadovoljavajuće čvrstoće za kasnije rukovanje.

Za postizanje ovih ciljeva postoji nekoliko pristupa. Općenito se tehnike mogu kategorizirati prema: načinu izvođenja operacije (kontinuirani-prekidni), veličini pritiska (visoki-niski), brzini sabijanja (visoka-niska), temperaturi (sobna-povišena), smjeru pritiska (jednoosni-hidrostatski). Hladno prešanje u kalupu predstavlja najčešće korištenu metodu i smatra se konvencionalnom tehnikom. Ta metoda uključuje krute kalupe i posebne mehaničke ili hidraulične preše. Slijedom ciklusa sabijanja (za male dijelove potrebno je nekoliko sekundi) mogu se postići gustoće do 90%. Prahovi ne reagiraju na prešanje na isti način kao tekućina i ne pretpostavljaju istu gustoću duž cijelog kompaktiranog materijala. Trenje između praha i stijenke kalupa te između pojedinih čestica praha ometa prijenos tlaka [9]. Postupak hladnog prešanja u kalupu prikazan je na slici 2.3.



Slika 2.3. Hladno prešanje u kalupu [10]

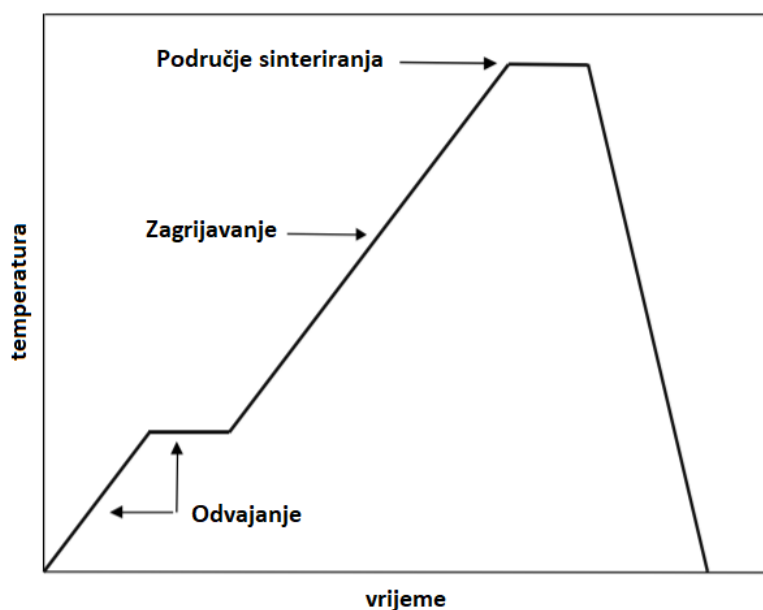
Među postupcima kompaktiranja tvrdih metala, najčešće se koristi izostatičko prešanje pod hladnim (CIP) ili vrućim (HIP) uvjetima kako bi se dobili dijelove visoke gustoće te izotropnih svojstva. Pri hladnom izostatičkom prešanju, prah se utiskuje u posudu pod izostatskim tlakom. Valjci za vruće valjanje čeličnih žica izrađuju se u tvrdoj izvedbi, temeljenoj na WC sustavu s vezivom (kobalt-nikl-krom), postupkom metalurgije praha koji uključuje hladno izostatičko prešanje [11]. Na slici 2.4. prikazan je postupak hladnog izostatičkog prešanja.



Slika 2.4. Postupak hladnog izostatičkog prešanja [12]

Prah se sipa unutar gumene vrećice te se gumena vrećica i metalni plašt postavljaju u čelični spremnik. Plašt je centriran na donjoj čeličnoj osnovnoj ploči. Tijekom punjenja praha kalup se pritisne kako bi se postigla što veća gustoća. Tada gornja gumena kapa zatvara spremnik koji je na kraju zatvoren gumenim poklopcem i uskim metalnim trakama. Cijeli sklop ubacuje se u posudu hladne izostatičke preše koja se u proizvodnim pogonima pumpa do maksimalnog tlaka do 2200 bara. Nakon pritiska, tlak se polako oslobađa i gumeni dio se širi do prvobitnog promjera. Dio se izvadi iz posude, kalup se očisti i ponovo napuni. Vruće izostatičko prešanje (HIP) se izvodi na sličan način samo su temperature znatno veće (između 1350 °C i 1400 °C) [11].

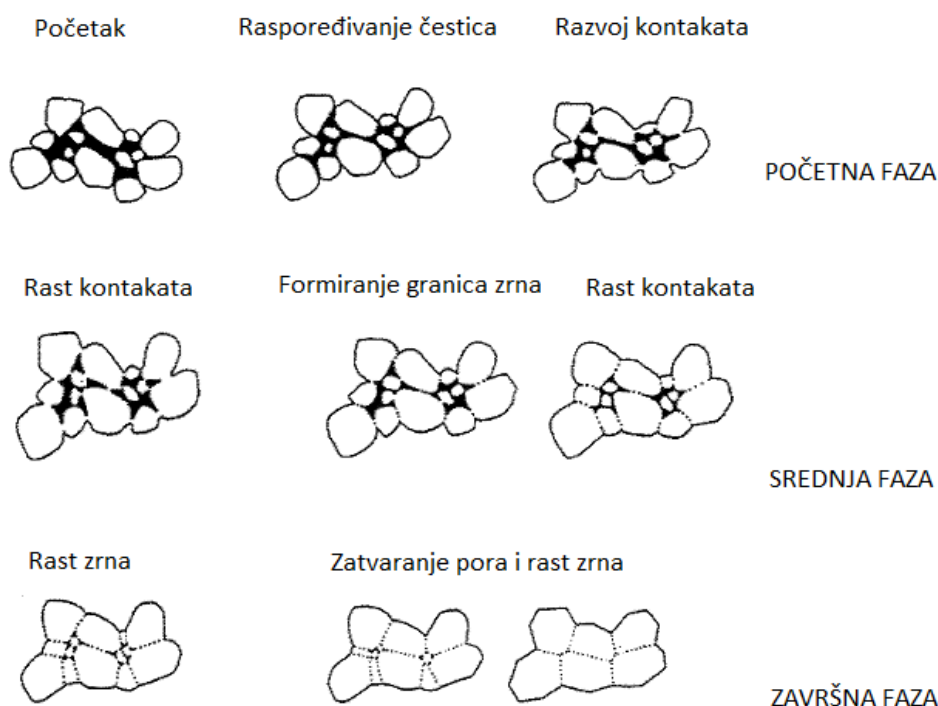
Sinteriranje je proces zbijanja i formiranja čvrstog kompaktnog materijala zagrijavanjem na temperaturu malo nižu od temperature taljenja osnovnog praha u smjesi. Metali na osnovi WC-Co obrađuju se sinteriranjem u rastaljenoj fazi kompaktirane smjese prahova volframovih karbida i kobalta. Za optimizaciju mikrostrukture koja je zaslužna za izvanredna mehanička svojstva takvih materijala koristi se finija veličina praha. Sitni prah je sklon vrlo brzom rastu zrna WC-a tijekom sinteriranja te se zbog toga dodaju male količine inhibitora rasta zrna kao što su karbidi kroma ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) i vanadija (VC). Uvjeti obrade, definirani prije nekoliko desetaka godina za smjese WC-Co s mikro veličinom, moraju biti značajno modificirani za sinteriranje praha submikronske veličine i s dodacima inhibitora. Kompletna termička obrada mora osigurati potpuno gusti materijal koji se sastoji od glavnih faza WC i Co, s finom i homogenom mikrostrukturom. To zahtijeva vrlo dobru kontrolu zgušnjavanja, razvoja faznih konstituenata i mikrostrukture tijekom procesa [13]. Postupak sinteriranja uključuje tri koraka predstavljena u tipičnom ciklusu temperatura/vrijeme prikazanom na slici 2.5.



Slika 2.5. Dijagram postupka sinteriranja [13]

Prvi korak, „Odvajanje“, uklanja organsko mazivo uvedeno kako bi se štetni komadići i dio nečistoća kao što su kisik (O) i vodena para ( $\text{H}_2\text{O}$ ) apsorbirali na površini praha. Drugi korak, zagrijavanje do temperature sinteriranja  $T_s$ , dovršava uklanjanje nečistoća i postiže najveće skupljanje. Posljednji korak, „Područje sinteriranja“, dovodi do pune gustoće, ali često potiče rast zrna. Tipični uvjeti su 350-450 °C i 1 sat za fazu odvajanja te 1380-1450 °C i 1 sat za

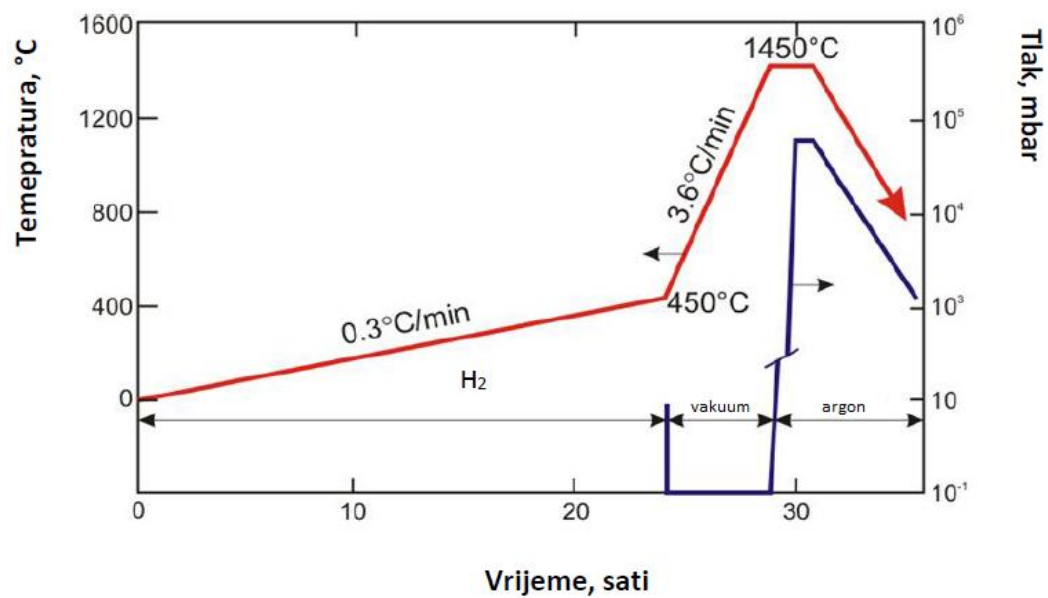
područje sinteriranja. Kao zaštitna atmosfera koriste se argon i vodik [13]. Proces sinteriranja u rastaljenoj fazi odvija se u tri faza koje su prikazane na slici 2.6.



Slika 2.6. Rast zrna tijekom procesa sinteriranja u rastaljenoj fazi [14]

U početnoj fazi čestice mijenjaju svoj raspored te se sitne čestice razmještaju u prostore između većih čestica. Nakon preraspodjele, diguzijom atoma se ostvaruje kontakt između čestica te se u srednjoj fazi, rastom kontaktne površine, sve više smanjuju pore između zrna. Polako se formiraju granice zrna, gustoća se povećava i kontaktna površina sve više raste. U završnoj fazi povećavaju se zrna i pore se zatvaraju do kraja te se postiže maksimalna gustoća.

Za proizvodnju WC-Co tvrdih metala primjenjuje se i sinter/HIP postupak. Postupak se odvija u jednom ciklusu u kojem se zagrijavanjem u vakuumu otklanjaju plastifikatori, kompaktirani komad se sinterira te se vruće izostatički preša u atmosferi inertnog zaštitnog plina. Na ovaj način se postižu puno bolja svojstva dijelova od onih koji su dobiveni samo sinteriranjem ili samo vrućim izostatičkim prešanjem. Dijagram sinter/HIP postupka u proizvodnji WC-Co tvrdih metala prikazan je na slici 2.7. [3].

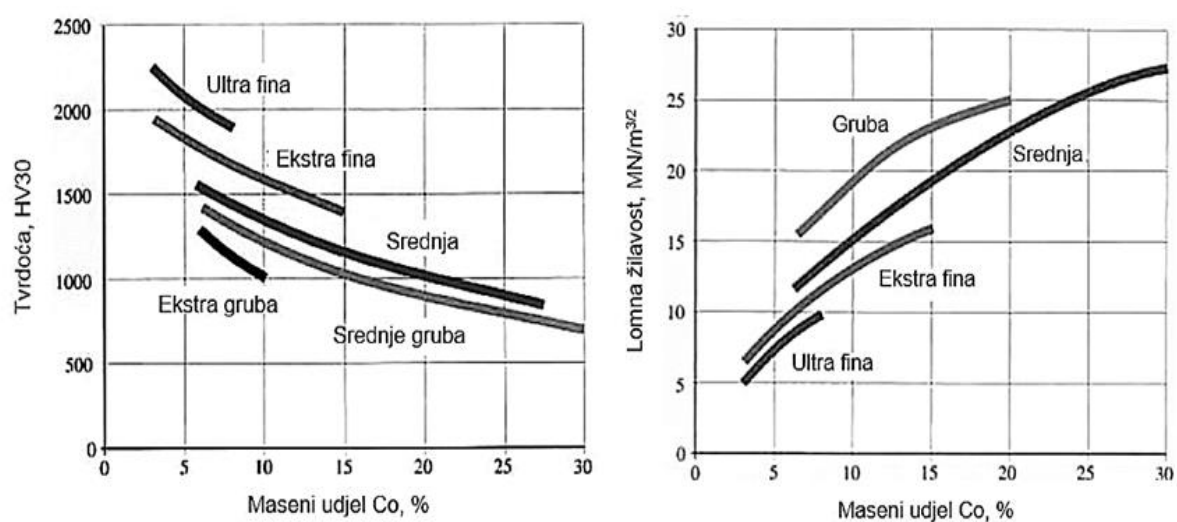


Slika 2.7. Sinter/HIP postupak proizvodnje WC-Co tvrdih metala [15]

### 3 MEHANIČKA SVOJSTVA TVRDIH METALA I NJIHOVA PRIMJENA

Tvrdoća i lomna žilavost su najbitnija svojstva tvrdih metala odnosno za njihovu primjenu za rezne alate. Tvrdoća tvrdih metala varira između 700 HV30 i 2200 HV30 te ona najviše ovisi o sadržaju kobalta i karbida te veličini karbidnog zrna. Porastom udjela kobalta u tvrdom metalu tvrdoća se smanjuje, a lomna žilavost raste [16]. Inhibitori rasta zrna su razlog više tvrdoće ultrastrukturiranih i nanostrukturiranih tvrdih metala. U pojedinim tvrdim metalima mogu se naći karbidi titanija, niobija i tantala koji pozitivno djeluju na porast tvrdoće te povišuju otpornost na deformiranje. Vrijeme i temperatura sinteriranja također utječu na tvrdoću. Duljim držanjem na većoj temperaturi sinteriranja rastu zrna te se tvrdoća smanjuje. Lomna žilavost ( $K_{IC}$ ) materijala je zapravo njegova otpornost prema širenju pukotine te se kao parametar koristi za kontroliranje kvalitete i računanje dugotrajnosti tvrdog metala. Tvrdi metali s mekom i žilavom Co matricom imaju veću lomnu žilavost od onih s Ni i Fe matricom. Zaključuje se da kemijski sastav materijala, njegova mikrostruktura i veličina zrna kao i parametri postupka praškaste metalurgije značajno utječu na žilavost i tvrdoću [3].

Tvrdoća i lomna žilavost tvrdih metala su obrnuto proporcionalni. Na slici 3.1. je prikazan utjecaj veličine zrna i udjela kobalta na njihovu tvrdoću i lomnu žilavost [3].

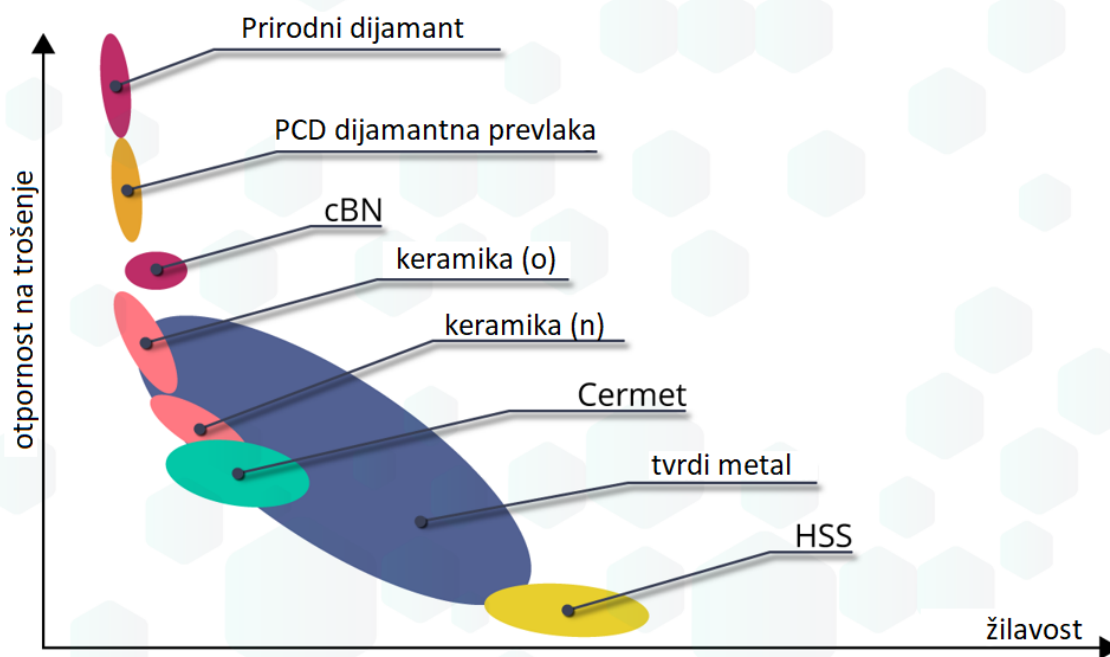


Slika 3.1. Utjecaj veličine zrna i udjela kobalta na tvrdoću i lomnu žilavost [2]



Osim tvrdoće i lomne žilavosti važna su i ostala mehanička svojstva tvrdih metala. Modul elastičnosti ( $E$ ) čiji je raspon između 450 i 670 GPa povećava se smanjenjem kobalta te je 2 do 3 puta veći nego kod čelika. Dinamička izdržljivost ( $R_d$ ) tvrdih metala također raste smanjenjem kobalta, ali i smanjenjem zrna volframovih karbida. Važna je za korištenje reznih alata izloženih dinamičkom opterećenju. Savojna čvrstoća ( $R_{ms}$ ) se smanjuje s porastom temperature, a najveću čvrstoću imaju tvrdi metali s 15% kobalta srednjeg i grubog zrna. Tlačna čvrstoća ( $R_{mt}$ ) kao i dinamička izdržljivost povećava se smanjenjem udjela kobalta i veličine zrna te može dosezati čak do 7000 N/mm<sup>2</sup> [16].

Ono što tvrde metale čini tako jedinstvenim u odnosu na ostale materijale je ogroman raspon u variranja njihovih svojstava. Usporedba otpornosti na trošenje i žilavosti različitih materijala prikazana je na slici 3.2. [1].



Slika 3.2. Ovisnost otpornosti na trošenje i žilavosti za različite skupine materijala [1]

Tvrđi metali se primjenjuju u različitim granama industrije (građevina, rudarstvo, bušenje nafte, obrada kamena i drva...), ali najviše se upotrebljavaju za alate u obradi metala. Njihova visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, velik modul elastičnosti, visoka tlačna i savojna čvrstoća te dobra otpornost na koroziju i visoke temperature omogućuje precizniju i bržu obradu, a time i dobivanje vrlo kvalitetne površine. Stoga se oni primjenjuju za rezne pločice tokarskih noževa

(slika 3.3.), glodala (slika 3.4.), svrdla i krune za bušenje, rezne pile (slika 3.5.) itd. Razvojem tehnologije područje primjene je sve šire a primjenom prahova male veličine zrna (nano i ultra) omogućuje se izrada i različitih mikroalata poput mikrosvrdla koja se koriste u elektroničkoj industriji [3].



Slika 3.3. Pločica od tvrdog metala noža za tokarenje [17]



Slika 3.4. Pločice tvrdog metala na glodalima [18]

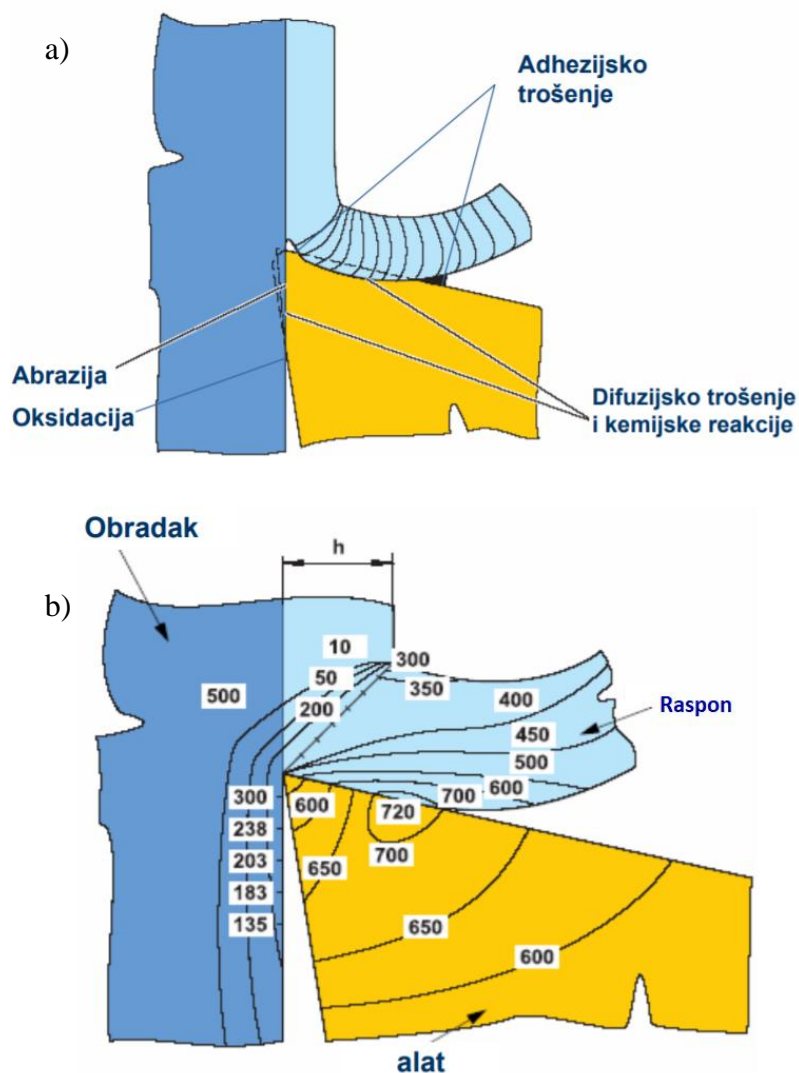


Slika 3.5. Rezne pločice pile za rezanje [19]

## 4 MEHANIZMI TROŠENJA REZNOG ALATA OD TVRDOG METALA

Od samog početka treba razlikovati fenomen trošenja i oštećenja. Klasična definicija trošenja, bez obzira na uzrok, koja se posebno odnosi na alate za rezanje, jest gubitak ili dislokacija mase materijala uzrokovan nekom vrstom tribološke pojave. Kod reznih alata od tvrdih metala produkti trošenja mogu se razviti jednim ili kombinacijom sljedećih mehanizama: adhezija, abrazija, umor površine, difuzija i oksidacija. Ti mehanizmi trošenja dovode do stalnog gubitka ili dislokacije materijala, koji se ne događa iznenada, već se razvija tijekom dugog vremenskog razdoblja. Iako oštećenje alata također dovodi do gubitka mase ili dislokacije mase, za razliku od trošenja, to se događa iznenada i neočekivano, što obično uključuje veći volumen mase alata. Značajke alata kao što su tvrdoća, lomna žilavost, veličina zrna, geometrija alata, parametri rezanja i uvjeti zahvata alata i obratka su važne varijable za sprečavanje trošenja alata odnosno njegov životni vijek [20].

Danas su već poznate korelacije između trošenja alata i udjela vezivne faze (kobalta), između trošenja alata i tlačne čvrstoće WC-Co tvrdog metala te između trošenja alata i normalne sile na površinu trošenja. Značajna poboljšanja otpornosti na trošenje mogu se postići razvojem nanostrukturiranih tvrdih metala. Smanjenje veličine zrna karbida kao i povećanje sadržaja veziva dovodi do povećanja otpornosti na plastičnu deformaciju. Mehanizam trošenja bi u svakom slučaju trebao biti blag, što znači da je poželjno da se kontakti materijali međusobno poliraju, što rezultira vrlo niskom specifičnom stopom trošenja. Nepoželjna suprotnost blagog trošenja je ozbiljno trošenje, pri čemu kontaktna površina postaje hrapavija zbog izbijanja velikih komada materijala. U mnogim slučajevima dolazi do prijelaza od blagog do ozbiljnog trošenja ako se opterećenje poveća. Osim toga, pojava zamora površine pri dugotrajnom promjenjivom opterećenju može izazvati brz prijenos iz blagog trošenja na ozbiljno trošenje [21]. Na slici 4.1. prikazani su različiti mehanizmi trošenja na prednjoj i stražnjoj površini alata te raspodjela temperature na obratku i alatu.



Slika 4.1. Dominantni mehanizmi trošenja i raspodjela temperature na alatu i obratku [22]

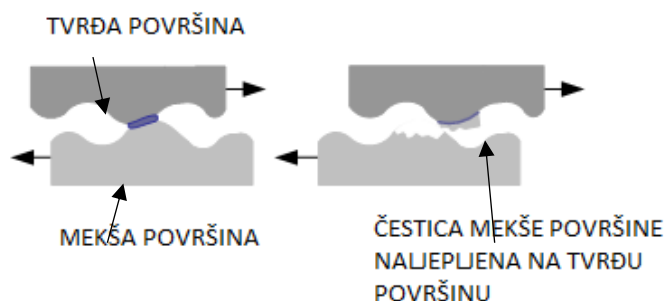
Na slici 4.1. (a) vidljivo je kako adhezijsko i difuzijsko trošenje nastupa na površini alata koja odvaja česticu obratka dok se abrazijsko i oksidacijsko trošenje javlja na stražnjoj površini alata. Slika 4.1. (b) predočava temperaturne gradijente na dijelovima alata i obratka. Vidljivo je kako su temperature alata najveće na površini koja odvaja česticu obratka upravo radi kontakta i velikih sila na tom dijelu.

Procesi trošenja reznog alata podijeljeni su u 2 skupine [22]:

1. procesi koji su posljedica mehaničkog djelovanja – **adhezija, abrazija, zamor površine,**
2. procesi koji su posljedica fizikalno-kemijskog djelovanja između alata, obratka i okoline – **difuzija i oksidacija.**

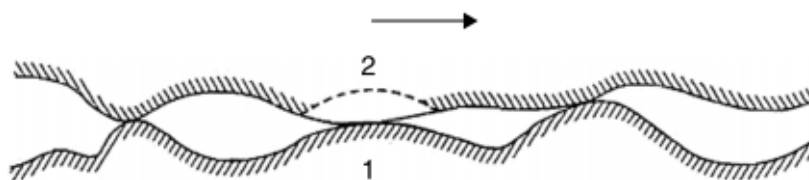
#### 4.1 Adhezija i formiranje naljepka na tvrdom metalu

Adhezijsko trošenje nastaje kada su dva ravna čvrsta tijela u kontaktu klizanjem, sa ili bez podmazivanja. Uslijed smicanja adhezija se pojavljuje na površinama u kontaktu (manje hrapava površina potiče adhezijsko trošenje). Adhezijsko trošenje nastupa smicanjem izbočina (neravnina) tijekom kontaktnog klizanja, što može dovesti do odvajanja materijala s jedne i naljepljivanja na drugu površinu (slika 4.2). Odvojeni fragmenti mogu otpasti s površine na koju su preneseni u obliku čestice trošenja. Neke čestice trošenja su slomljene procesom zamora uslijed ponovljenih opterećenja i rasterećenja, što rezultira odvajanjem čestica i gubitkom mase tijekom adhezijskog trošenja [23].



Slika 4.2. Proces adhezijskog trošenja [24]

Koeficijent trenja vrlo je značajan u procesu adhezijskog trošenja. Archard (1953.) ističe da se smicanje može dogoditi na izvornom sučelju ili u najslabijem području u jednom od dvaju tijela, kao što je prikazano na slici 4.3. U većini slučajeva, lom tijekom procesa smicanja će se pojaviti na sučelju (1) i neće doći do trošenja u tom kliznom ciklusu. U malom broju kontakata može doći do raskidanja veze unutar jednog od tijela pri čemu mali fragment materijala može ostati pričvršćen na površini drugog tijela [24].



Slika 4.3. Dvije mogućnosti loma (1 i 2) tijekom smicanja [23]



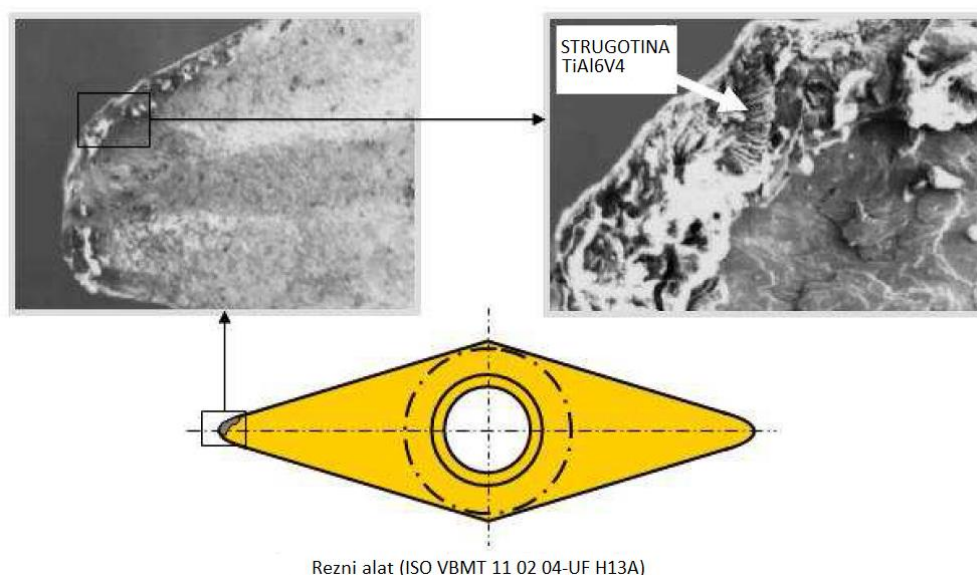
Budući da je smicanje najjače na prednjoj površini alata, prvi sloj metala koji udara u površinu alata se na nju lijepi. Učinkovito, navedeni prvi sloj postaje dio alata. Proces se ponavlja i, nakon nekog vremena, formira se naljepak (engl. *Built-up edge*, skraćeno BUE) koji može biti debeo nekoliko stotina mikrometara. BUE češće nastaje kad je brzina rezanja mala zato što pri velikim brzinama rezanja metal koji se odmiče od obratka postaje dovoljno vruć da se oporavi prije nego se uhvati na površinu alata te se na taj način sprječava formiranje naljepka [25]. Naljepak predstavlja problem prilikom obrade „ljepljivih“ metala poput čelika s niskim udjelom ugljika, nehrđajućeg čelika i aluminija. Naljepak je materijal od radnog komada koji se nadovezuje na lice alata za rezanje. Ako se to dogodi, ishod će vjerojatno biti loš završni sloj, koji može pogodovati pojavi i širenju pukotina što u konačnici može ne samo funkcionalno onemogućiti rad strojnog dijela već dovesti i do pojave loma, havarije i sl. Kad se, na primjer, obrađuje prirubnica može doći do pogreške i mora se sve napraviti iznova. U isto vrijeme, tanki i stabilni naljepak može se koristiti za zaštitu alata od trošenja smanjenjem trenja između reznog alata i obratka [26].

Posljedice koje uzrokuje formirani naljepak [26]:

- Naljepak uvijek mijenja geometriju reznog alata, uključujući i kut rezne oštice. To utječe na dimenzionalnu kontrolu obratka tijekom strojne obrade,
- Materijal naljepka se očvršćuje pri radu i abrazivan je. Kada se mali komadići alata za rezanje zalijepe na obradak oni oštećuju njegovu površinu,
- Što je naljepak veći, to je površina grublja,
- Čvrste odvojene čestice koje prolaze između alata i obratka mogu dovesti do trošenja stražnje površine alata,
- S naljepkom na samom alatu dubina reza postaje dublja,
- Svaki put kad se neki komad odvoji može sa sobom povući i dio alata za rezanje. To dovodi do preranog trošenja alata.

Kod glodanja, mehanički lom ili trošenje alata za rezanje može biti uzrokovano problemima na ulazu ili izlazu alata iz obratka. Prema Machado i da Silvi (2004) i Kabalčinu (1980), strugotine nekih materijala, kao što su titanij i nehrđajući čelik, imaju tendenciju da se zalijepe i zadrže na površini alata neposredno prije izlaska zubaca alata iz obratka, gdje se zaglavljaju tijekom okretanja glodala. Kada zubi alata ponovno uđu u radni obradak nakon nastavka ciklusa rezanja, strugotine mogu uzrokovati trošenje rubova alata. Opseg oštećenja alata ovisi o različitim

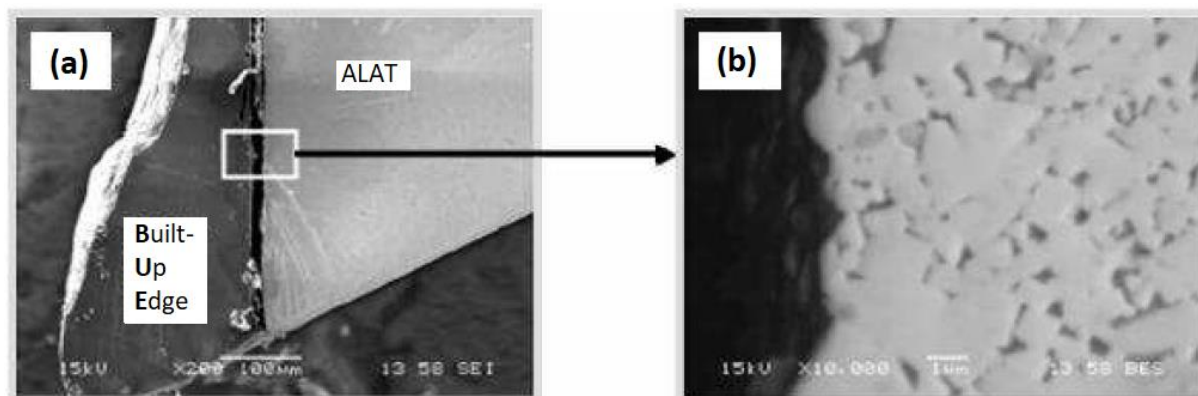
parametrima kao što su vrsta obrađivanog materijala, mehanička otpornost alata i njegove geometrijske značajke, uvjeti rezanja, itd. Na slici 4.4. prikazan je takav fenomen kod tokarenja TiAl6V4 legure tvrdometalnim alatom. Može se uočiti snažna adhezija strugotina i materijala obratka na reznjoj ošttrici alata [20].



Slika 4.4. Adhezijsko trošenje alata od tvrdog metala kod obrade TiAl6V4 legure [20]

Slika 4.5. (a) prikazuje veliki naljepak (BUE) formiran nakon strojne obrade aluminijske legure pri niskim brzinama rezanja (trajanje obrade – 7 min.; brzina rezanja – 60 okr/min; posmak – 0,1 mm/okr.). Ovaj režim obrade je karakteriziran kombinacijom najnižih temperatura i najvećih naprezanja na sučelju alat-strugotina, što dovodi do adhezije naljepljivnjem WC zrna na reznju površinu čime se otežava daljnja obrada, slika 4.5. (b). U takvoj situaciji, ako je naljepak nestabilan on može odvojiti male čestice reznog alata koje uzrokuju trenje i time progresivno trošenje alata [20].





Slika 4.5. SEM slike ošttrice tvrdo-metalnog reznog alata nakon obrade Al-legure [20]

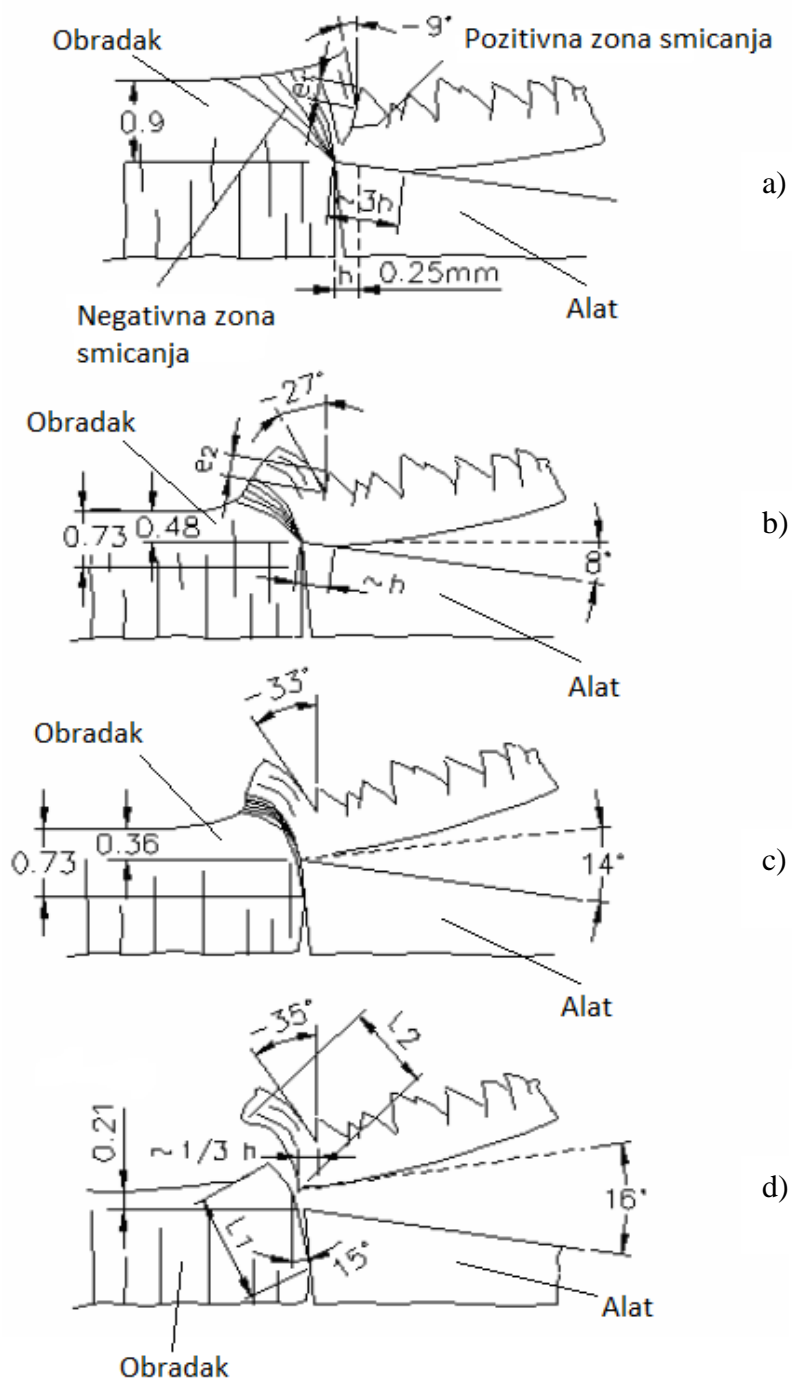
U testovima s kuglom od silicij-nitrida, diskovi od WC-Co tvrdog metala pokazuju povećanu otpornost na trošenje s porastom njihove tvrdoće. Krhotine koje zaostaju tijekom kliznog trošenja mogu se akumulirati na površini i formirati tribofilmski ili mehanički miješani sloj. Tribofilmski ima različita svojstva od izvornog materijala i stoga može utjecati na naknadno tribološko ponašanje. Ovo formiranje tribofilma na tvrdim metalima uočio je Engqvist nakon suhog kliznog trošenja kada mali fragmenti WC-a pomiješani s Co vezivom povećavaju površinsku žilavost tvrdog metala i stoga utječu na otpornost trošenju [27]. Tvrdi metali imaju visoku otpornost na trošenje kod kliznog kontakta, osobito kod visokih normalnih opterećenja. Fragmentacija WC-a u male krhotine također je važna za ublažavanje naprezanja u materijalu. Navedene značajke i visoka lomna žilavost tvrdih metala govore o njenoj sposobnosti da izdrži visoke pritiske bez pojave velikog trošenja [27].

Nekoliko studija je pokazalo da dodavanje karbida kroma ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) i vanadija (VC) u WC-Co tvrdi metal također utječe na trošenje i mehanička svojstva tvrdih metala. Ovi karbidi su inhibitori rasta zrna tijekom sinteriranja čime u konačnici povećavaju tvrdoću i žilavost. Štoviše, oni utječu na trenje što poboljšava otpornost tvrdih metala na adhezijsko trošenje [28].

#### 4.1.1 Fenomen formiranja stopala

Prema Pekelharingu (1978.), prekomjerno trošenje alata može se pojaviti kada zubi alata izlaze iz obratka. On je promatrao ponašanje primarne ravnine smicanja koja se rotira i postaje negativna kako alat izlazi iz radnog komada. Krajnji rezultat tog procesa je formiranje onoga što je autor nazvao „formiranje stopala“, jer tako oblikovana strugotina podsjeća na ljudsko stopalo. Negativna smicanja koja nastaju zbog rotacije primarne ravnine smicanja uzrokuju da

brzina strugotine postaje negativna, što uzrokuje dodatna naprezanja na površini vrha alata, koja uzrokuju pojačano trošenje. Slika 4.6. prikazuje fenomen oblikovanja „stopala“ [20].



Slika 4.6. Formiranje strugotine u obliku stopala prilikom izlaska alata iz obratka [20]

- a) Na prikazu a) slike 4.6., rub alata je oko  $0,9$  mm udaljen od izlaza iz pratećeg ruba obratka. Ovdje počinje negativno smicanje, iako je pozitivna smična zona još uvijek

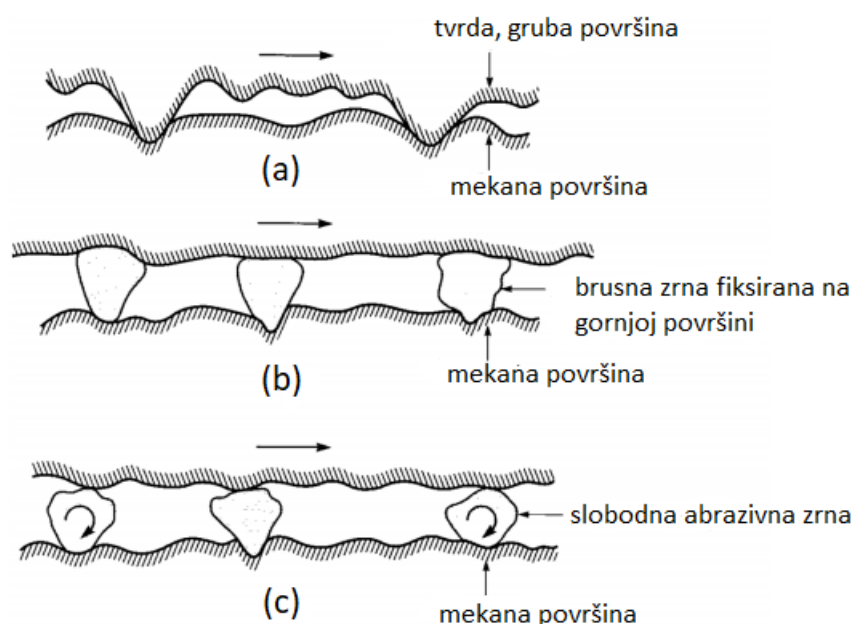
vidljiva. Stopalo slijedi smjer negativnog smicanja i vidljiva je rotacija ravnine s kutom od  $-9^\circ$ . Strugotina se nalazi u kontaktnoj duljini strugotina-alat od približno 0,75 mm s nulom rotacijom [20].

- b) Na slici 4.6. (b) rub alata je samo 0,48 mm udaljen od ruba obratka. Negativna primarna ravnina smicanja skuplja se, sada sa još većom rotacijom, pokazujući kut od  $-27^\circ$  sa strugotinom koja također pokazuje laganu rotaciju od  $8^\circ$ . Duljina kontaktne površine strugotina-alat je smanjena na približno 0,25 mm. Može se primijetiti da je smicanje na pozitivnoj ravnini smicanja završilo, oblikujući spoj između stopala i noge. Na donjem kraju negativne ravnine smicanja počinje se razvijati pukotina [20].
- c) Slika 4.6. (c) predočava rub alata koji je udaljen 0,36 mm od zadnjeg ruba obratka. Negativna ravnina smicanja postaje tanja, zakrivljujući se još dalje prema lijevoj strani. Kut njena nagiba sada iznosi  $-33^\circ$  dok je strugotina zakrenuta za kut od  $14^\circ$ . U ovoj fazi pukotina raste u ravnini smicanja [20].
- d) Na prikazu (d) slike 4.6. rub alata je još uvijek udaljen 0,21 mm od zadnjeg ruba obratka, dok su stopalo i noga već oslobođeni od obratka. Ta se situacija događa zato što je pukotina napredovala kroz cijelu negativnu ravninu smicanja. U ovom trenutku kut negativne ravnine smicanja iznosi  $-35^\circ$ , a duljina kontaktne površine strugotina-alat svedena je na samo  $\approx 0,08$  mm. Strugotina rotira pod kutom od  $16^\circ$  [20].

Negativno smicanje uzrokovano rotacijom primarne ravnine smicanja potiče negativnu brzinu strugotine, kratko producirajući naprezanje uzduž dužine kontakta alata. Taj se proces odvija vrlo brzo, tako da je alat, koji je trenutak ranije bio pod visokim tlačnim opterećenjem, sada izložen vlačnom opterećenju. Ova promjena može uzrokovati i pucanje vrha alata ako nije dovoljno čvrst. Ovaj tip trošenja može se spriječiti skraćivanjem krajnjeg ruba obratka ili postavljanjem kuta izlaza alata većeg od  $20^\circ$  ili manjeg od  $-45^\circ$ . S tim geometrijama rezanja, debljina nedeformirane strugotine je dovoljno mala da spriječi oštećenje alata [20].

## 4.2 Abrazija

Abrazijsko trošenje nastaje klizanjem neravnina hrapave tvrde površine ili tvrdih čestica po mekšoj površini pri čemu dolazi do oštećenja površine putem plastične deformacije ili loma. To je zapravo trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim izbočinama ili tvrdim česticama. Mehanizmi abrazijskog trošenja djelotvorni su samo za vrijeme direktnog fizičkog kontakta između dviju površina, a kada su te površine odvojene kapljevitim slojem ili filmom abrazijsko trošenje ne dolazi do izražaja. U većini situacija kod abrazijskog trošenja dolazi do grebanja i na mekšoj površini nastaju brazde odnosno žljebovi, koji su paralelni sa smjerom klizanja [29]. Na slici 4.7. prikazano je abrazijsko trošenje između dva tijela koja ostvaruju relativno gibanje u međusobnom kontaktu.



Slika 4.7. Shematski prikaz abrazijskog trošenja [29]

Na prikazu (a) slike 4.7. vidljivo je da nema abrazivnih čestica već tvrda i hrapava površina s istaknutim vrhovima klizi po mekanoj površini. Na prikazu (b) slike 4.7., brusna zrna su fiksirana na gornjoj površini. Na prikazu (c) slike 4.7., predloženo je abrazijsko trošenje mekane površine uslijed djelovanja abrazivnih čestica koje se slobodno gibaju između površina u kontaktu. Abrazija tvrdog metala uzrokovana je prodiranjem abrazivne čestice i uklanjanjem materijala lomljenjem i plastičnim klizanjem. Otpornost na abraziju se opisuje mehaničkim svojstvima kao što su tvrdoća i lomna žilavost. Varijacije veličine zrna tvrde, krute WC faze i volumnog udjela duktilne kobaltne faze daju WC-Co kompozitima širok raspon

svojstava između duktilnog i krhkog ponašanja. Istraživanja su pokazala da se u abrazivnom trošenju materijal uklanja s površine tvrdih metala mehanizmima koji uključuju grubu plastičnu deformaciju uslijed popuštanja i istiskivanja vezivnog metala te lom zbog širenja pukotina u vezivnom metalu i fragmentacije karbida. Utvrđeno je da mikrostruktura ima odlučujuću ulogu pri određivanju načina loma i mehaničkih svojstava, a time i otpornosti na abrazivno trošenje tvrdih metala. Snižavanjem sadržaja kobalta ili smanjenjem veličine zrna WC povećava se tvrdoća kompozita, a povećanje tvrdoće prati gubitak lomne žilavosti. Očito je da je trošenje lokalni događaj, a lokalna otpornost na deformacije i pucanje može odigrati ulogu čija se priroda i veličina ne mogu lako izvesti iz svojstava materijala. Eksperimenti s pojedinačnim tvrdim česticama na WC-Co kompozitu pokazali su da krater nastaje pucanjem zrna WC-a kada je veličina zrna velika, dok je kod male veličine WC zrna krater uglavnom rezultat plastične deformacije vezivne faze. To znači da je lomno ponašanje WC zrna, koje ima značajan utjecaj na otpornost abraziji, povezano s veličinom karbidne faze. Gornji koncepti su značajni jer sugeriraju da finija mikrostruktura može dati tvrdim metalima veću otpornost na abraziju neovisno o povećanju tvrdoće. [30]. Na slici 4.8. je prikazana površina grubozrnatog WC-Co materijala s 20% Co nakon provedenog testa brazdanja (100 ponavljanja, nisko opterećenje). Smjer klizanja je s lijeva na desno [31].

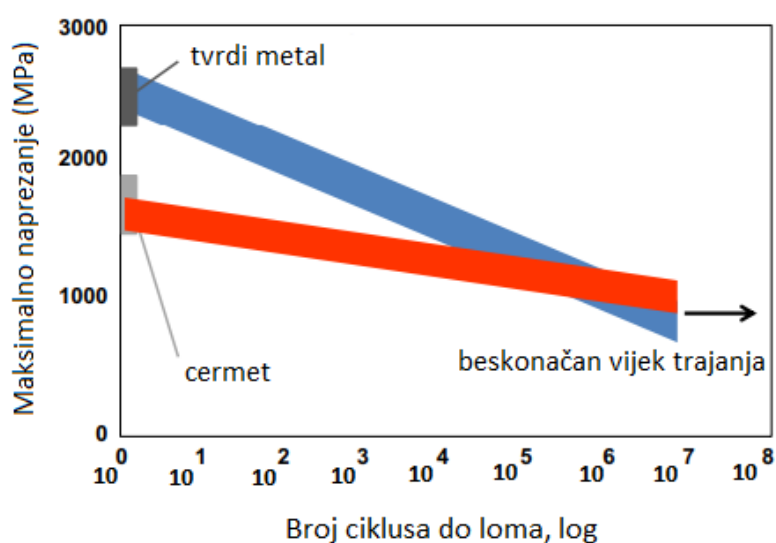


Slika 4.8. Površina WC-Co tvrdog metala s 20% Co nakon provednog testa brazdanja [31]

### 4.3 Zamor površine

Zamor površine uzrokuju ponovljeni ciklusi opterećenja i rasterećenja kojima se materijal podvrgava. Ti ciklusi mogu izazvati stvaranje potpovršinskih ili površinskih pukotina koje nakon kritičnog broja ciklusa mogu rezultirati pucanjem površine i stvaranjem velikih fragmenata materijala koji iza sebe ostavljaju relativno velike rupice [30]. Najčešće korišten pristup ispitivanja zamora površine konstrukcijskih materijala je određivanje krivulje naprezanje-broj ciklusa ( $S - N$ ), također poznate kao Wöhlerov dijagram. To vrijedi i za tvrde metale. Ovdje se uvijek mjeri brojem ciklusa do loma za glatke uzorke koji su izloženi određenom promjenjivom naprezanju. Parametar definiran ovom metodologijom je dinamička izdržljivost za određeni broj ciklusa (obično u rasponu od  $10^6$  do  $10^8$  ciklusa) poznata i kao granica zamora [32].

Veličina zrna i udio kobalta predstavljaju dominantne čimbenike u kontroli zamora WC-Co tvrdih metala. Granica zamora finoizrnatih tvrdih metala je viša nego za gruboizrnate i općenito je veća od one za Co-legure. Mnoga su istraživanja bila usredotočena na sobnu temperaturu i visokotemperaturno ponašanje tvrdih metala. Pokazalo se da je pri nižim temperaturama vezivo kobalta podvrgnuto faznoj transformaciji iz FCC u HCP strukturu. Međutim, na višim temperaturama izgleda da oksidacija veziva u blizini vrhova pukotina i krhkih i duktilnih prijelaza miješanih karbida igra važnu ulogu u zamoru [33]. Slika 4.9. prikazuje usporedbe zamora kod cikličkih opterećenja za tvrde metale i ostale cermete.



Slika 4.9. Wöhlerov dijagram za tvrde metale i ostale cermete [32]

Na slici 4.9. vidi se kako tvrdi metali mogu podnijeti znatno veće maksimalno naprezanje od drugih cermeta kod  $10^1$  ili  $10^2$  ciklusa. Smanjenjem narinutog naprezanja raste broj ciklusa koji ovi materijali mogu izdržati do loma.

#### 4.4 Oksidacija

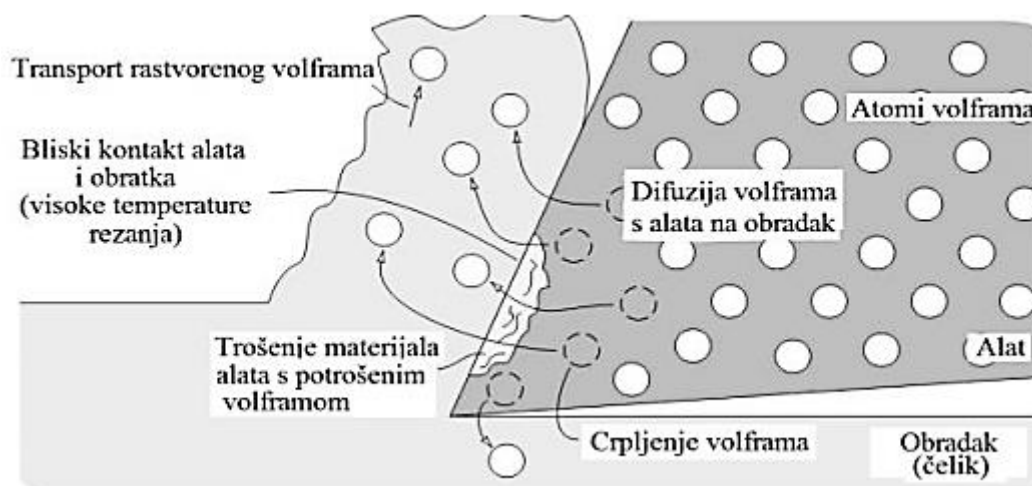
Oksidacija reznog alata od WC-Co tvrdog metala na povišenoj temperaturi jedan je od ključnih čimbenika u određivanju njihovog vijeka trajanja. Oksidni filmovi se vrlo lako ljušte i degradiraju otpornost na trošenje. Oksidi koji se formiraju na WC-Co tvrdom metalu uglavnom se sastoje od  $WO_3$  i  $CoWO_4$  i male količine  $Co_2O_3$  i  $Co_3O_4$ .  $WO_3$  faza ima relativno malu otpornost na oksidaciju jer sadrži brojne pore i pukotine kroz koje  $O_2$  i  $CO_2$  lako difundiraju u unutrašnjost materijala. Usporedno,  $CoWO_4$  faza je manje porozna od  $WO_3$  i ima bolju otpornost na oksidaciju. Stoga se otpornost na oksidaciju tvrdih metala poboljšava povećanjem sadržaja Co i dodatkom kubičnih karbida, kao što su TiC, TaC i NbC. Međutim, oksidacijska otpornost pada ako se Co vezivo djelomično zamijeni Ni vezivom zbog smanjenja sadržaja kompleksnog oksida (Co, Ni)  $WO_4$  [34].

Na Sveučilištu u Bostonu znanstvenik Basu proučavao je fenomen oksidacije alata od tvrdog metala pri rezanju ugljičnog čelika na visokim temperaturama. Rezultati su pokazali da se brzina oksidacije reznog alata WC-Co povećava s povećanjem postotka kisika u zraku. Kada temperatura prelazi  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , brzina oksidacije raste. Studije Yinan Li pokazuju da rezanjem nehrđajućeg čelika alatom od tvrdog metala, temperatura često doseže do  $800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  te da je oksidacijsko trošenje jedan od glavnih razloga trošenja reznog alata [35].

#### 4.5 Difuzija

Difuzijsko trošenje između radnog komada i alata tijekom obrade je problem koji je široko zastupljen kod strojne obrade metala. Većina provedenih istraživanja bavi se trošenjem alata u u postucima obrade čelika. Smatra se da je difuzija elemenata (W, C, Co) iz alata u radni komad izvor trošenja, a time i degradacije životnog vijeka alata. Znanstvenik Naerheim je analizirao difuzijsko trošenje tijekom obrade čelika reznim alatom sastava WC-TiC-Co. Prema njemu, elementi kao što su volfram (W), ugljik (C) i kobalt (Co) imaju tendenciju kontinuirane difuzije u površinu obrađivanog komada. Ovakva difuzija ne dopušta zasićenje difuzijskih elemenata na sučelju alat – obradak, pri čemu bi se brzina trošenja smanjila ili bi se trošenje posve

zaustavilo. Nadalje, poznato je da je titanij kemijski reaktivan s atmosferskim plinovima kao što je kisik pri visokim temperaturama, kao i s nekim elementima kao što je ugljik. Prilikom obrade titanijevih legura dolazi do reakcije titanija s ugljikom, pri čemu nastaju čvrsti spojevi na površini obrađivane legure koji uzrokuju pojačano trošenje alata. Ovaj proces se inicira difuzijom ugljika iz alata u radni komad i nakon toga slijedi reakcija s Ti atomima pri čemu se formira TiC sloj [36]. Na slici 4.10. prikazan je mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata od tvrdog metala.



Slika 4.10. Mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata od tvrdog metala [37]

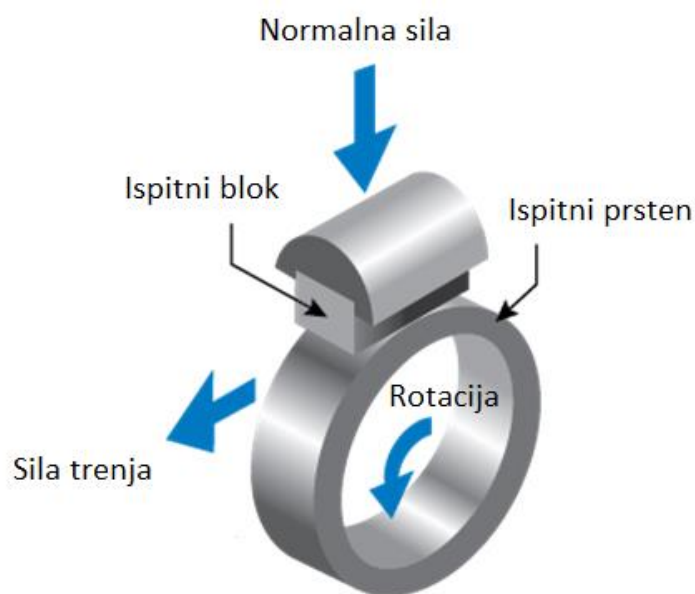
Prilikom obrade čelika velikom brzinom rezanja, čime se razvijaju visoke temperature, može doći do međudifuzije između alata i radnog komada što rezultira stvaranjem kratera na površini samog alata. Slika 4.10. prikazuje krater koji je nastao na površini tvrdo-metalnog alata difuzijom atoma volframa iz alata u obradak.



## 5 LABORATORIJSKE METODE ISPITIVANJA ADHEZIJE

### 5.1 Metoda „prizma po prstenu“

Otpornost materijal na adhezijsko trošenje može se odrediti metodom „prizma po prstenu“ (engl. „*block on ring*“) sukladno normi ASTM G77. Ovaj test je široko primjenjiv za procijenu ponašanje kliznog trošenja materijala u različito simuliranim uvjetima te omogućava pouzdano rangiranje parova materijala za specifične tribološke namjene. Kod ove metode sustav se sastoji od stacioniranog uzorka za ispitivanje (bloka) koji se pod djelovanjem određenog opterećenja nalazi u kontaktu s rotirajućim prstenom. Ovdje se može trošiti uzorak i/ili ispitni prsten. Tragovi trošenja su linijskog oblika. Mjerenjem gubitka volumena ispitnog bloka te ispitnog prstena dobivaju se rezultati trošenja. Gubitak volumena, nakon određenog vremenskog perioda, mjeri se u  $\text{mm}^3/h$ . Manji gubitak volumena imat će materijali koji su otporniji na trošenje. Ukoliko se ispituju maziva potrebno je mjeriti temperaturu u tom procesu. Temperatura se može mjeriti termoparom koji je postavljen u ispitnom uzorku na određenoj dubini. Kada se postigne zadano vrijeme ispitivanja ili zadani broj okretaja ispitnog prstena ispitivanje se automatski zaustavlja. Na slici 5.1. prikazana je metoda ispitivanja trošenja materijala „prizma po prstenu“ [38].



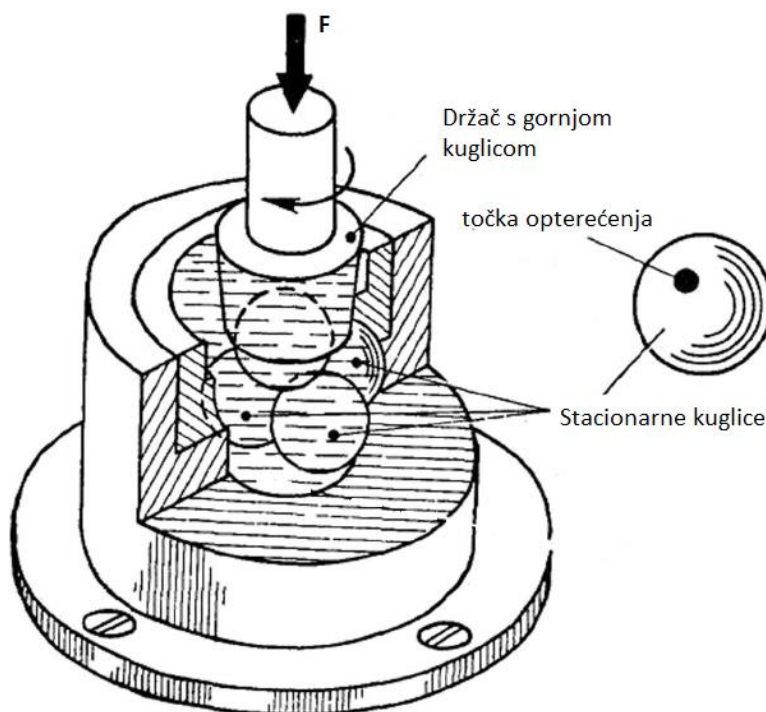
Slika 5.1. Metoda ispitivanja „prizma po prstenu“ [39]

Veličine koje se mjere tijekom i nakon ispitivanja [38]:

- gubitak mase ispitnog bloka,
- gubitak mase ispitnog prstena,
- sila trenja,
- širina traga trošenja,
- izdržljivost mazivnog filma (ukoliko postoji).

## 5.2 Metoda „četiri kuglice“

Ispitivanje se provodi na uređaju koji sadrži četiri kuglice, od čega su tri stacionarne, učvršćene u držaču, dok gornja kuglica opterećena silom  $F$  rotira zadanim brojem okretaja  $n$ . Sila  $F$  može biti konstantna ili se kontinuirano povećava tijekom ispitivanja. Kada se dostigne određeni iznos sile, vrijeme ispitivanja ili ako dođe do međusobnog zavarivanja kuglica ispitivanje se zaustavlja. Trag trošenja snima se digitalnom kamerom i mjeri pomoću programa za analizu slike a može se mjeriti i mjernim mikroskopom [38]. Slika 5.2. prikazuje metodu ispitivanja „četiri kuglice“.



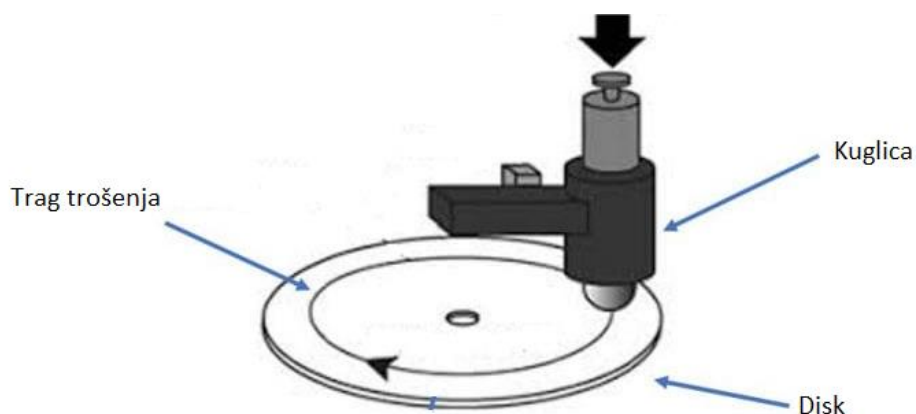
Slika 5.2. Metoda ispitivanja „četiri kuglice“ [40]

Značajke koje se mjere metodom ispitivanja „četiri kuglice“ [38]:

- brzina rotacije,
- normalna sila,
- koeficijent trenja,
- trag trošenja na kuglicama,
- temperatura maziva (ukoliko postoji),
- vrijeme trajanja ispitivanja.

### 5.3 Metoda „kuglica po disku“

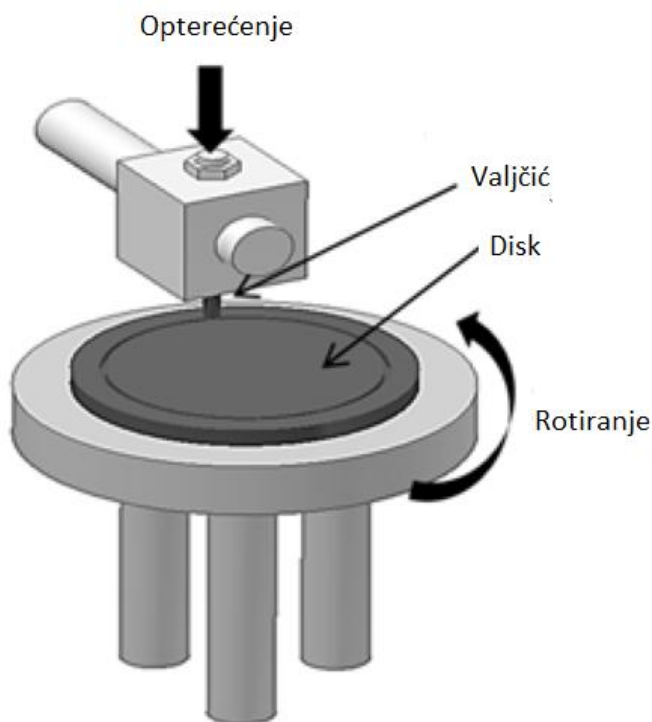
Metoda ispitivanja „kuglica po disku“ (engl. „*ball on disc*“) koristi kuglicu koja se nalazi u nosaču i silom  $F$  pritišće uzorak učvršćen na disku koji rotira određenom brzinom. Radijus kontakta se može mijenjati, a nakon ispitivanja na uzorku ostaje kružni trag trošenja. Uvjeti ispitivanja mogu varirati što uključuje podmazivanje pri niskim i visokim temperaturama u kontroliranoj atmosferi s određenim udjelom vlage u zraku. Maksimalna brzina klizanja kuglice po uzorku je 14 m/s pri sili opterećenja i do 1000 N. Kuglica može biti keramička ili metalna. Veličina trošenja se mjeri profilnom analizom trošene površine i analizom mikrostrukture dok se trenje kontinuirano snima tijekom ispitivanja. Igla profilometra koristi se i za mjerenje površine poprečnog presjeka traga trošenja. Ova se površina mjeri na nekoliko mjesta i množi se s duljinom traga te se na taj način točnije određuje gubitak volumena uzorka. Trošenje kuglice izračunava se uz pomoć traga trošenja na mjestu kontakta. Trošenje površine uzorka i kuglice izražava faktor trošenja koji predstavlja omjer volumena trošenja ( $\text{mm}^3$ ) i puta klizanja (m) odnosno sile (N). Otpornost trošenju je veća uz manji faktor trošenja [38]. Na slici 5.3. je prikazana metoda ispitivanja „kuglica po disku“.



Slika 5.3. Metoda ispitivanja „kuglica po disku“ [41]

## 5.4 Metoda „valjčić po disku“

Uređaj koji se koristi kod ispitivanja metodom „valjčić po disku“ (engl. „*pin on disc*“) sastoji se od diska na kojem se nalazi uzorak koji rotira zadanom brzinom i držača valjčića kojim se on pritišće na uzorak normalnom silom  $F$ . Uređaj još sadrži elektronički senzor za mjerenje sile trenja koji uz pomoć računalnog programa za analizu očitava parametre te ispisuje i pohranjuje podatke. Ispitivanje se može provesti uz prisutnost maziva ili bez njega. Ono traje dok ne prođe definirano vrijeme ili dok se ne postigne određeni broj okretaja diska. Mjerenjem žlijeba trošenja uz pomoć profilometra te mjerenjem količine potrošenog materijala definira se trošenje uzorka [38]. Na slici 5.4. prikazana je metoda ispitivanja „valjčić po disku“.



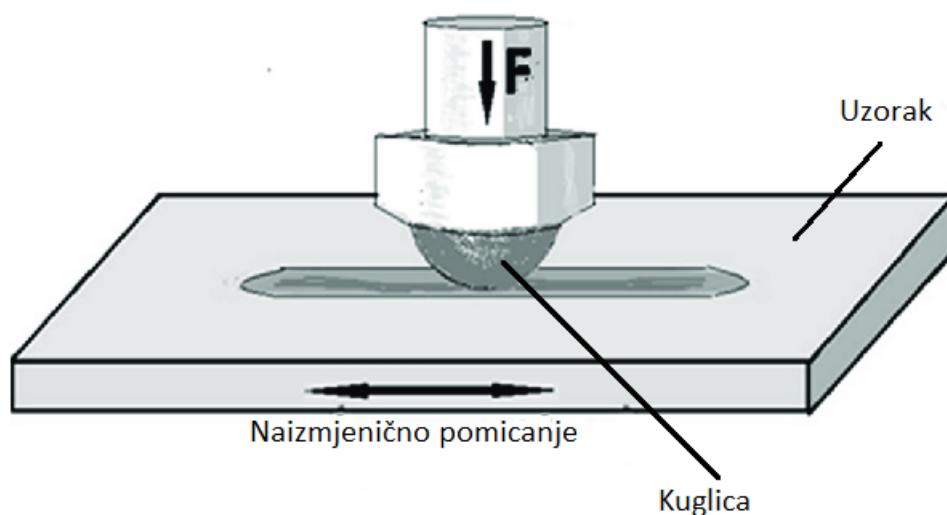
Slika 5.4. Metoda ispitivanja „valjčić po disku“ [42]

Značajke ove metode su [38]:

- trošenje ispitnog uzorka i valjčića,
- koeficijent trenja,
- broj okretaja diska,
- temperatura.

### 5.5 Metoda „kuglica po ploči“

Metoda „kuglica po ploči“ (engl. „*ball on flat*“) uključuje kuglicu koja se linearno giba po ploči kako bi se ispitalo klizno trošenje keramičkih, metalnih i ostalih materijala [38]. Shema ispitivanja prikazana je na slici 5.5.



Slika 5.5. Metoda ispitivanja „kuglica po ploči“ [43]

Tijekom ispitivanja uzorak u obliku kuglice, opterećen određenom vertikalnom silom, klizi po površini tankog ravnog uzorka koji je postavljen horizontalno. U zadanim uvjetima uzorci se pomiču pravocrtno jedan prema drugom, naprijed – nazad. Prema normi koja definira ovo ispitivanje odabiru se duljina pomaka kuglice, frekvencija klizanja, normalna sila, vrijeme ispitivanja i temperatura [38].

Značajke koje se mjere ovom metodom su [38]:

- profil traga trošenja,
- gubitak mase ploče,
- smanjenje promjera kuglice,
- sila trenja.

## 6 EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE TVRDIH METALA

U eksperimentalnom dijelu rada ispitano je adhezijsko trošenje tvrdih metala i izmjerena je tvrdoća prstena korištenog pri ispitivanju. Ispitivanja su napravljena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje adhezijskog trošenja je provedeno na tri uzorka tvrdog metala različitog sadržaja kobalta: WC-5Co (5% Co), WC-10Co (10% Co) i WC-15Co (15% Co). Svaki od tih uzoraka je proizveden sinter/HIP postupkom metalurgije praha. Nakon miješanja čistih prahova volfram karbida i kobalta smjesa prahova je komaptirana u uzorak određenog oblika (zeleni izradak). Zatim je sirovac vruće izostatički prešan u zaštitnoj atmosferi inertnog plina pri temperaturi od 1450 °C kako bi se dobio čvrsti uzorak spreman za ispitivanje. Slika 6.1. prikazuje uzorak s 5% kobalta. Adhezijsko trošenje ispitivano je metodom „prizma po prstenu“ (engl. „*block on ring*“) na sva tri uzorka uz primjenu novog prstena za svako ispitivanje. Prsten koji se koristio za ispitivanje je vanjski prsten igličastog ležaja 1R30X35X17 napravljen od čelika za ležajeve oznake 100Cr6. Tvrdoća ispitnog prstena mjerena je metodom po Vickersu uz opterećenje 1 x 9,81 N (metoda HV1).



Slika 6.1. Uzorak tvrdog metala s 5 % kobalta

### 6.1 Priprema uzoraka i ispitna metoda

Adhezijsko ispitivanje zahtjeva određene dimenzije uzorka te čistu, glatku i kvalitetnu površinu. Budući da su uzorci bili preveliki za ispitivanje metodom prizma po prstenu, svaki

od tri uzorka prvo je izrezan na debljinu od 17 mm (slika 6.2.). Kako bi rezultati bili valjani, ispitne površine uzoraka tvrdog metala morale su se metalografski pripremiti brušenjem i poliranjem.



Slika 6.2. Izrezani uzorak WC-15Co

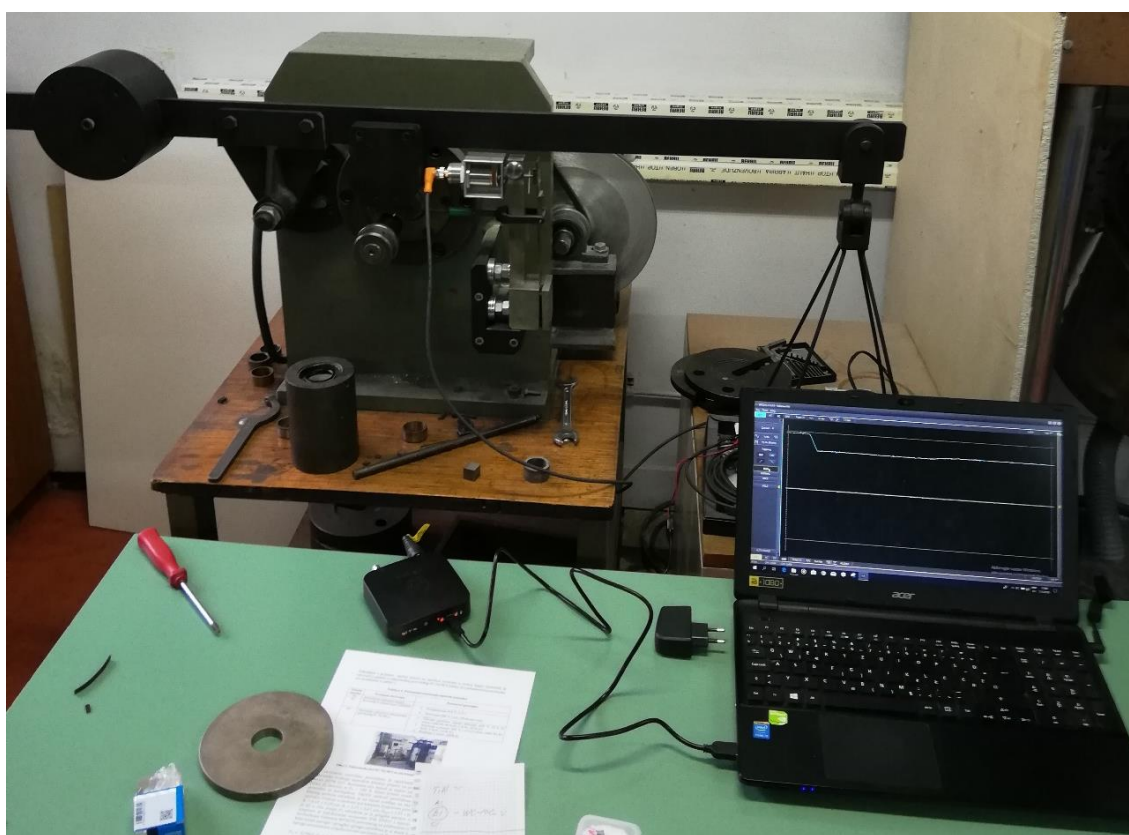
Faze brušenja i poliranja jesu sljedeće:

1. brušenje površine pločicom MD-Piano 120 (dijamantni abraziv) uz vodeno hlađenje,
2. fino brušenje površine uzorka pločicom MD-Allegro (dijamantna pasta veličine zrna 9  $\mu\text{m}$ ) uz hlađenje alkoholom ili vodom,
3. fino brušenje površine pločicom MD-Largo (dijamantna pasta veličine zrna 3  $\mu\text{m}$ ) uz hlađenje vodom ili alkoholom,
4. poliranje površine pločicom MD-Dac (dijamantna pasta veličine zrna 3  $\mu\text{m}$ ) uz hlađenje alkoholom ili vodom,
5. završno poliranje površine uzorka pločicom MD-Chem (koloidna slikatna pasta).

Adhezijsko trošenje ispitivano je moderniziranom metodom prizma po prstenu koja uključuje računalno prikupljanje i pohranu podataka, slika 6.3. Kao i u metodi s mjernom satom, ispitni uzorak oblika prizme postavlja se u držač. Zatim se stavlja uteg određene mase koji preko



poluge djeluje normalnom silom  $F_N$  na ispitni uzorak u kontaktu s rotirajućim prstenom. Prilikom trošenja površina u kontaktu mjeri se progib savojne opruge tijekom vibriranja uzrokovanog silom trenja. Gornja granica mjerenja određena je progibom 10 mm budući da isti nikada ne prelazi tu vrijednost. Ova metoda pri mjerenju koristi računalu, induktivni senzor II5917 tvrtke IFM, napajanje senzora, metu s ticalom i digitalni WiFi osciloskop. Vrtložne struje na meti, koja se približava i udaljuje (promjena induktiviteta zavojnice), uzrokuju vanjsko magnetsko polje koje uzrokuje promjene magnetskog polja unutar senzora što se na računalu obrađuje u svrhu izračuna faktora trenja.



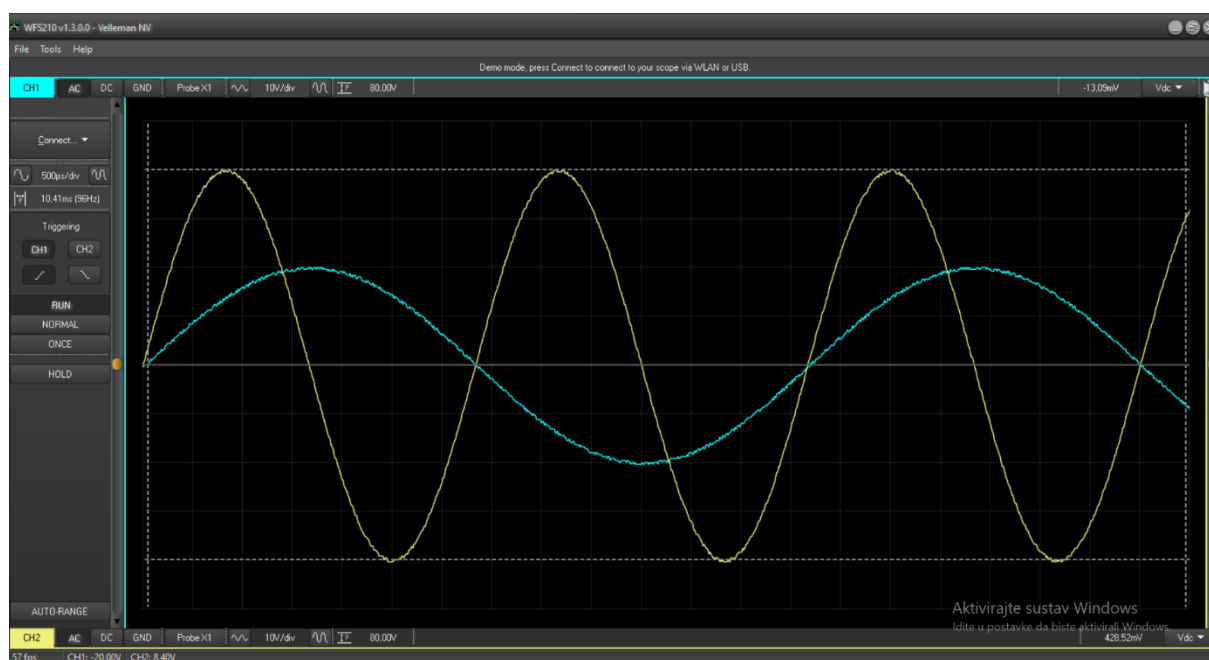
Slika 6.3. Metoda prizma po prstenu uz primjenu računala

## 6.2 Ispitivanje adhezijskog trošenja

Kao što je i ranije navedeno, za ispitivanje adhezijskog trošenja korištena je metoda prizma po prstenu u kombinaciji s računalom. U prvom koraku postavljaju se senzor i meta na uređaj za ispitivanje te se povezuju s napajanjem, digitalnim osciloskopom i računalom. Nakon povezivanja, pokreće se program na računalu WFS210 (slika 6.4.) te se namještaju parametri



ispitivanja. Kad su parametri namješteni uzorak se stavlja na ispitno mjesto i pokreće se elektromotor. Pri ispitivanjima svih triju uzoraka korišteni su utezi mase 5 kg što je rezultiralo normalnom komponentom sile  $F_N = 250$  N. Ovom se metodom faktor trenja dobiva iz vrijednosti napona te program koji se koristi pohranjuje podatke o naponu raspona od 0 do 10 V. Frekvencija mjerenja pri ispitivanju iznosila je 50 Hz što znači da je program bilježio napon svakih 0,02 sekunde. Ispitivanje je vremenski trajalo 30 sekundi tako da je za svaki uzorak snimljeno ukupno 1500 podataka o naponskom odzivu i pohranjeno u *Excel* datoteku.



Slika 6.4. Sučelje programa WFS210

Svaki podatak o naponskom odzivu ima određenu udaljenost mete od senzora. Raspon u kojem senzor detektira podatke je od 0 do 10 mm te se za svaki milimetar napon mijenja za 1,111 V. Pomoću programskog paketa *Excel* i pohranjenih 1500 podataka, jednostavno se izračunavaju udaljenosti. Za izračun udaljenosti mete koristi se sljedeća jednadžba:

$$S = \frac{U}{1,111} \quad (1)$$

gdje je:

$S$  – udaljenost mete od senzora [mm],

$U$  – napon [V],

1,111 – konstantna promjena napona za svaki milimetar [V/mm].

Nakon izračunate udaljenosti za svaki iznos napona potrebno je pronaći maksimalnu udaljenost mete od senzora  $S_{max}$  jer je to zapravo referentni položaj za sva ostala mjerenja. Kada je udaljenost maksimalna tada je djelovanje mete na magnetsko poslije senzora najslabije pa je zbog toga napon najveći pri maksimalnoj udaljenosti. Kako bi se izračunala sila trenja potrebna za dobivanje faktora trenja potrebno je izračunati pomak korištenjem jednadžbe:

$$u = S_{max} - S_{trenutni} \quad (2)$$

gdje je:

$u$  – pomak [mm],

$S_{max}$  – maksimalna udaljenost mete od senzora [mm],

$S_{trenutni}$  – trenutna udaljenost mete od senzora [mm].

Pomoću pomaka se izračuna sila trenja  $F_{tr}$ :

$$F_{tr} = u \cdot c + 0,0321 \quad (3)$$

gdje je:

$F_{tr}$  – sila trenja [N],

$u$  – pomak [mm],

$c$  – konstanta opruge ( $c=5,7965$ ),

0,0321 – konstanta.

Faktor trenja  $\mu$  se izračuna jednostavnim izrazom:

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_N} \quad (4)$$

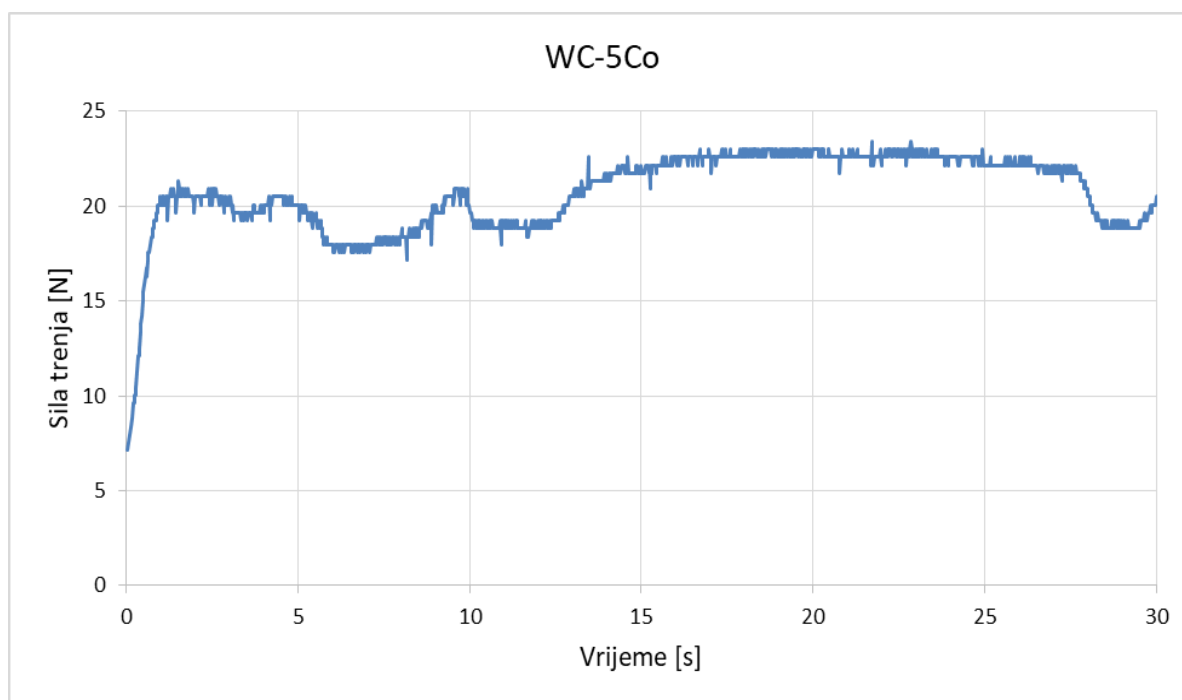
gdje je:

$\mu$  – faktor trenja,

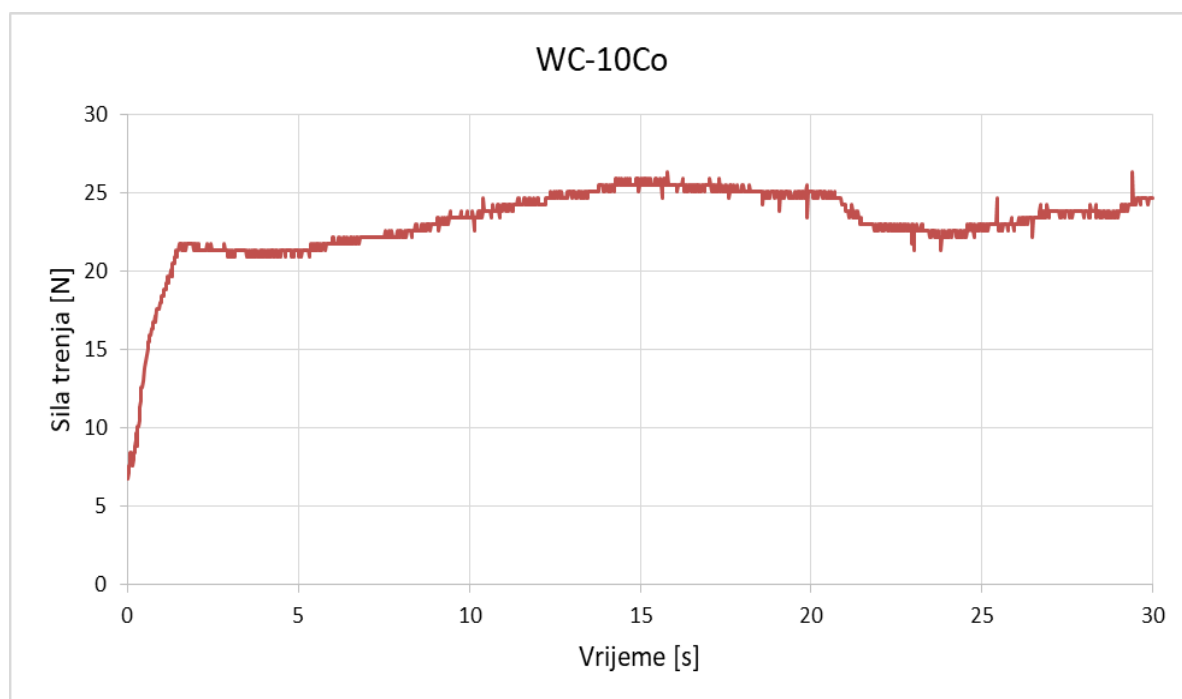
$F_{tr}$  – sila trenja [N],

$F_N$  – normalna sila [N].

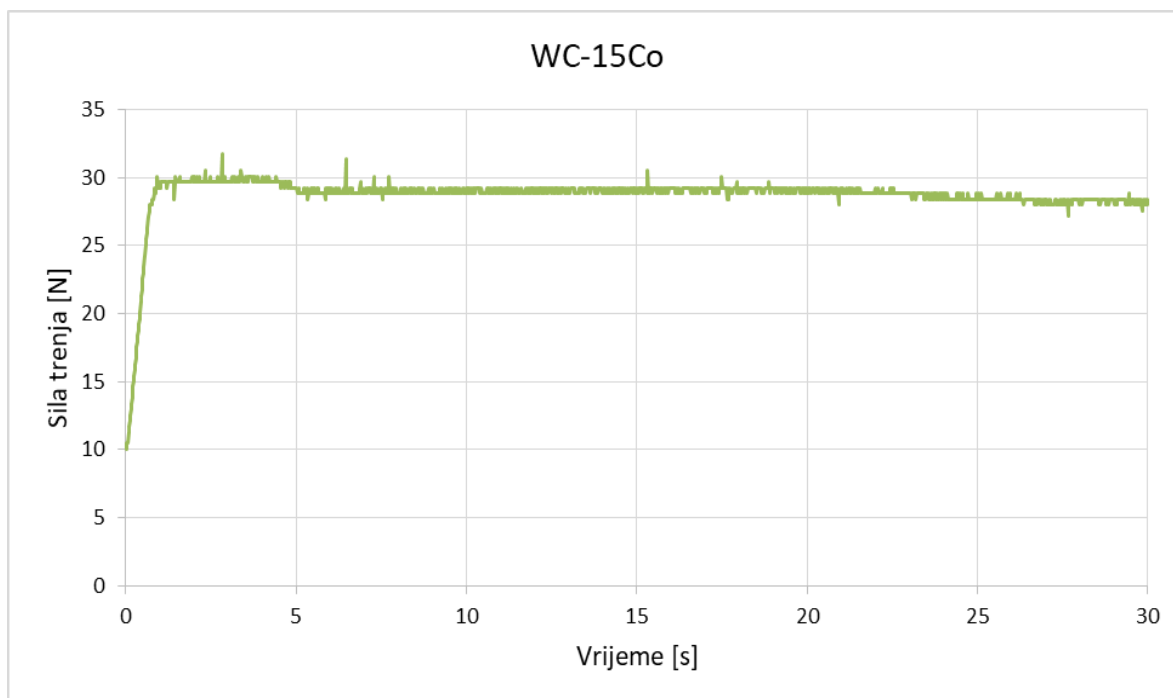
Pomoću ovih formula dobiveni su podaci o sili i faktoru trenja koji su predloženi grafičkim prikazima na sljedećim slikama.



Slika 6.5. Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-5Co

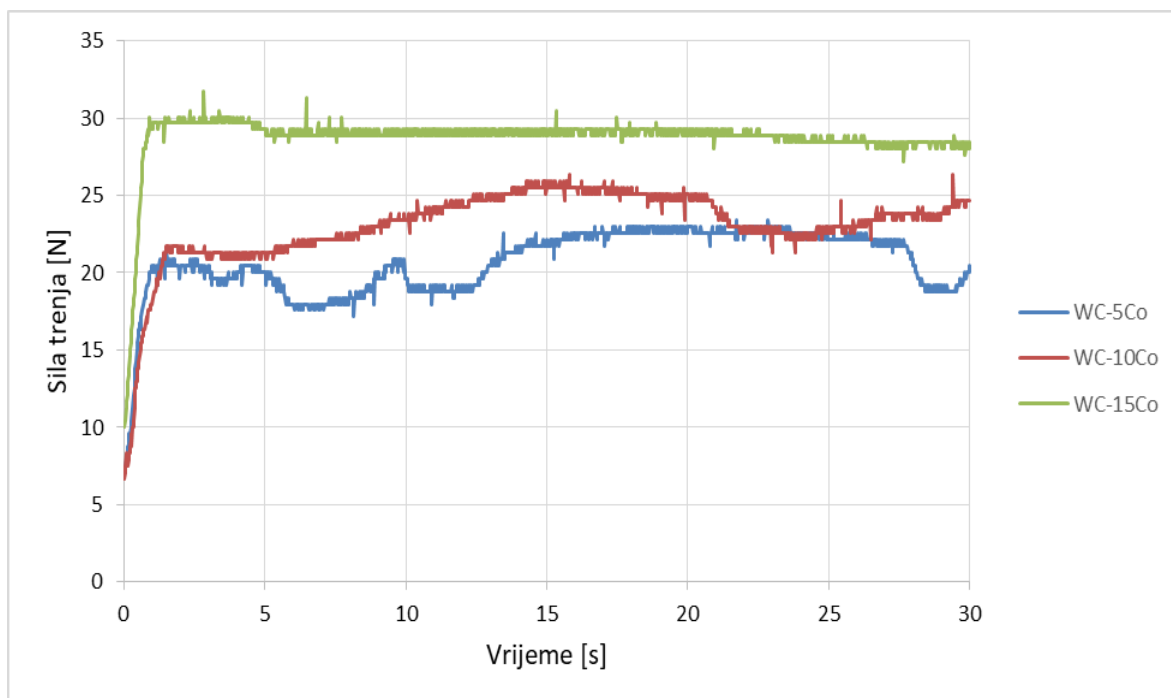


Slika 6.6. Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-10Co



Slika 6.7. Promjena sile trenja u vremenu za uzorak WC-15Co

Na slikama 6.5., 6.6. i 6.7. prikazani su grafovi promjene sile trenja za svaki od tri ispitivana uzorka. Može se primijetiti da sila trenja na početku raste do određene vrijednosti i potom se više ili manje stabilizira. Iz slike 6.5. koja prikazuje silu trenja za uzorak s 5% kobalta proizlazi da ova sila varira oko 20 N do petnaeste sekunde kada nešto malo poraste i zatim se stabilizira, ali se pred kraj ispitivanja ponovo snižava na prethodnu vrijednost. Slika 6.6. prikazuje promjenu sile trenja za uzorak s 10% kobalta te se vidi da sila trenja postepeno raste do petnaeste sekunde, dosežući maksimalnu vrijednost od 25, nakon čega se javljaju manje oscilacije. Krivulja sile trenja za uzorak s 15% kobalta prikazana je na slici 6.7. U ovom slučaju sila trenja u kratkom vremenskom periodu raste do 30 N te se zatim stabilizira oko navedene vrijednosti tako da gotovo uopće nema oscilacija.

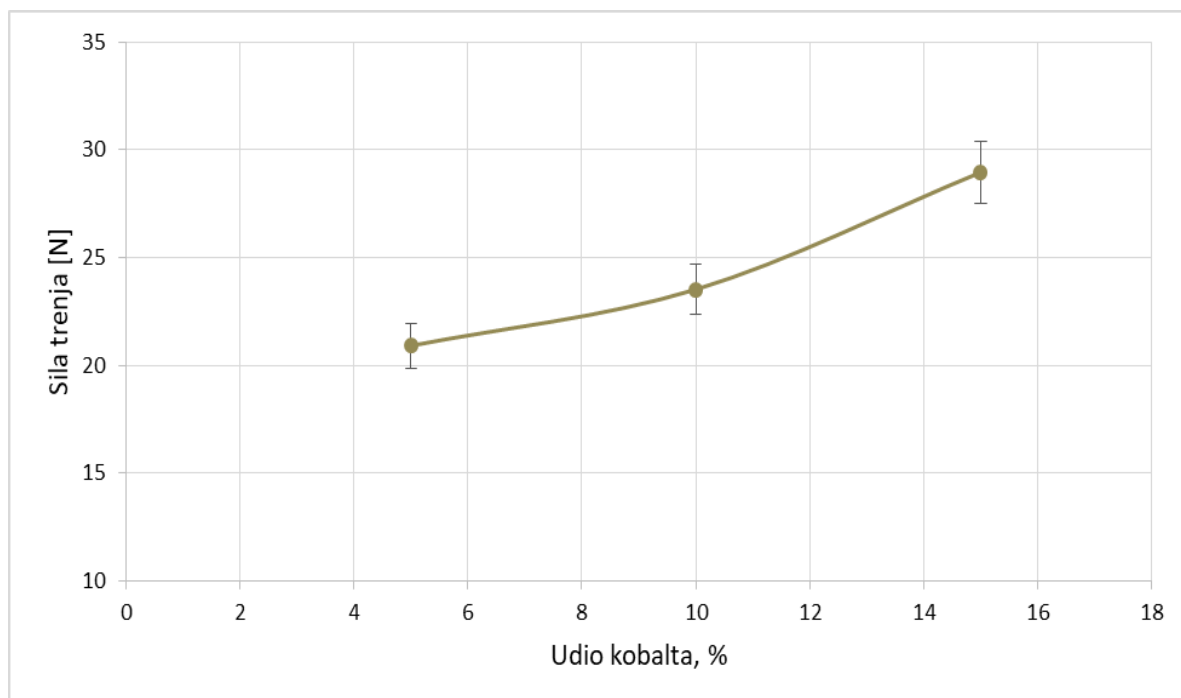


Slika 6.8. Usporedba sile trenja za sva tri uzorka

Slika 6.8. predočava usporedni prikaz sile trenja za sva tri ispitivana uzorka: WC-5Co, WC-10 Co i WC-15 Co. Očito je da sila trenja raste s porastom udjela kobalnog veziva. Sila trenja za uzorak s 5% odnosno 10% kobalta je približno ista do pete sekunde ispitivanja kada dolazi do značajnijeg odstupanja uzrokovanog povećanjem sile trenja za uzorak s većim sadržajem kobalta. Iako kasnije ova sila oscilira u principu je veća od sile trenja za uzorak s 5% kobalta koja se stabilizira oko niže vrijednosti. Sila trenja za uzorak s 15% kobalta približno je konstantna u cijelom vremenskom periodu i kreće se oko 30 N, što je više nego kod prethodna dva uzorka.

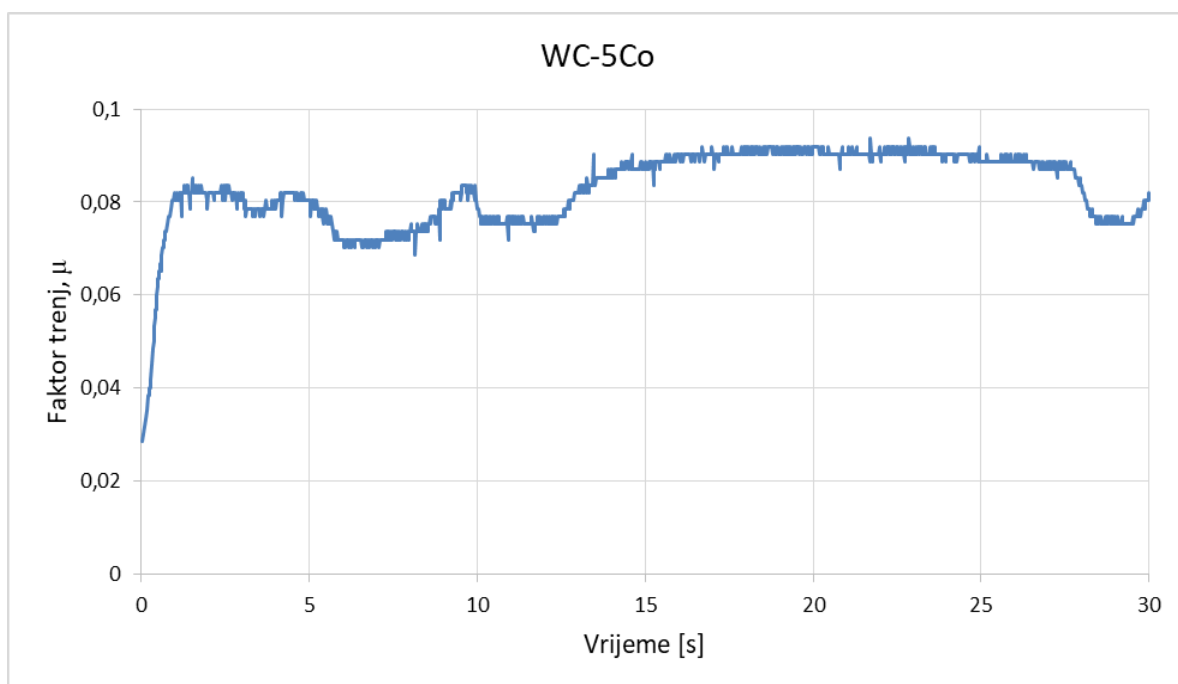
Tablica 1. Srednja vrijednost, minimum, maksimum i standardno odstupanje sile trenja

Uzorak	WC-5Co	WC-10Co	WC-15Co
Srednja vrijednost sile trenja [N]	20,913	23,524	28,958
Minimalna sila [N]	17,145	20,902	27,162
Maksimalna sila [N]	23,406	26,328	31,754
Standardno odstupanje [N]	1,680	1,411	0,444

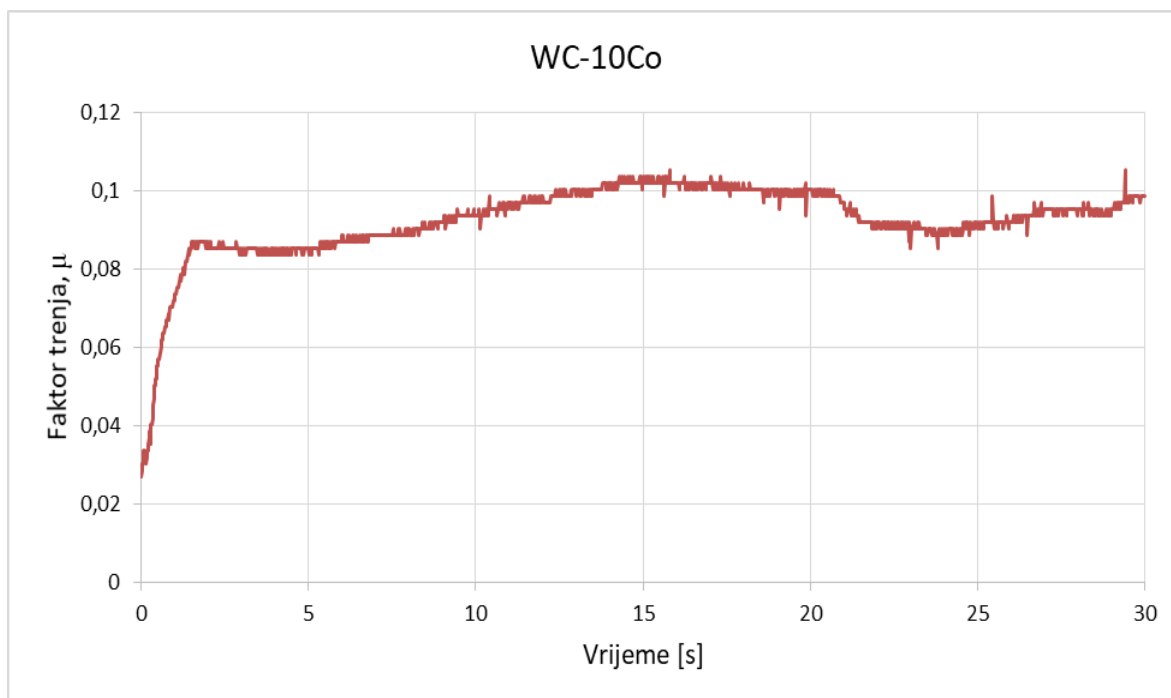


Slika 6.9. Ovisnost sile trenja o udjelu kobalta

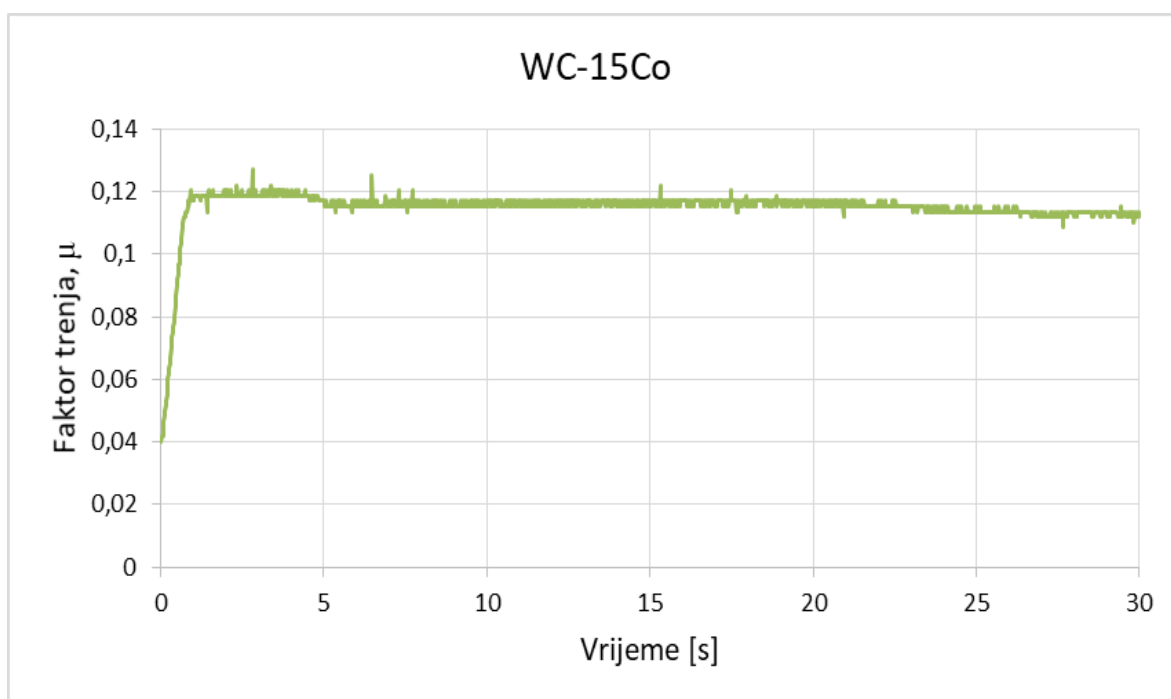
Iz tablice 1 kao i slike 6.9. vidljivo je da vrijednosti sile trenja rastu s povećanjem udjela kobalta. Statističke vrijednosti navedene u ovoj tablici odnose se na ispitivanja od druge sekunde kada je postignuta stabilizacija sile trenja. Standardno odstupanje za uzorak WC-15Co je manje nego kod uzoraka WC-5Co i WC-10Co.



Slika 6.10. Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-5Co



Slika 6.11. Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-10Co

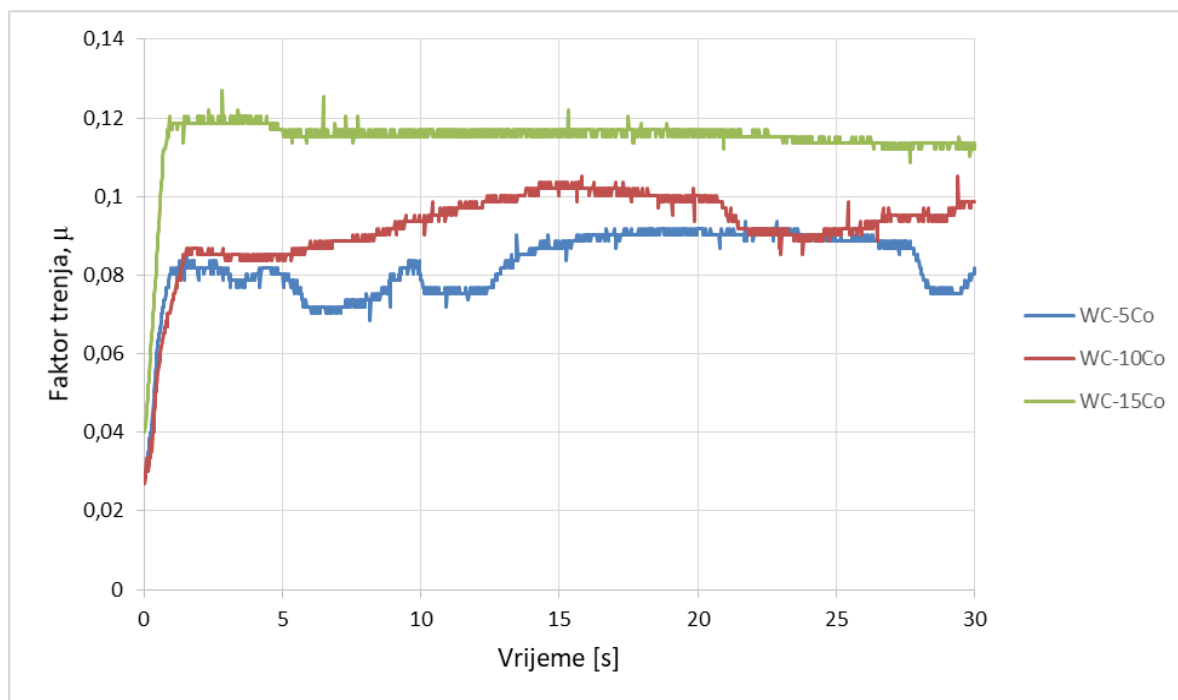


Slika 6.12. Promjena faktora trenja u vremenu za uzorak WC-15Co

Na slikama 6.10., 6.11. i 6.12. grafički je prikazana promjena faktora trenja za svaki od tri uzorka ispitivana u vremenskom periodu od 30 s. Kvalitativna promjena faktora trenja u osnovi slijedi varijacije sile trenja. Dijagramski prikaz na slici 6.10. ocrtava promjenu faktora trenja za

---

uzorak s najmanjim udjelom kobalta. Kod uzorka WC-5Co faktor trenja oscilira do petnaeste sekunde i zatim se stabilizira oko vrijednosti 0,09. Varijacije faktora trenja zabilježene kod uzorka srednjeg sadržja kobalta (slika 6.11.) ukazuju na njegovo lagano povećanje sve do vrijednosti 0,1 kada se ponovo javljaju određene oscilacije. Promjena faktora trenja uzorka s 15% kobalta predložena na slici 6.12. pokazuje kako faktor trenja raste do 0,12 i potom se stabilizira oko te vrijednosti uz vrlo male daljnje oscilacije.



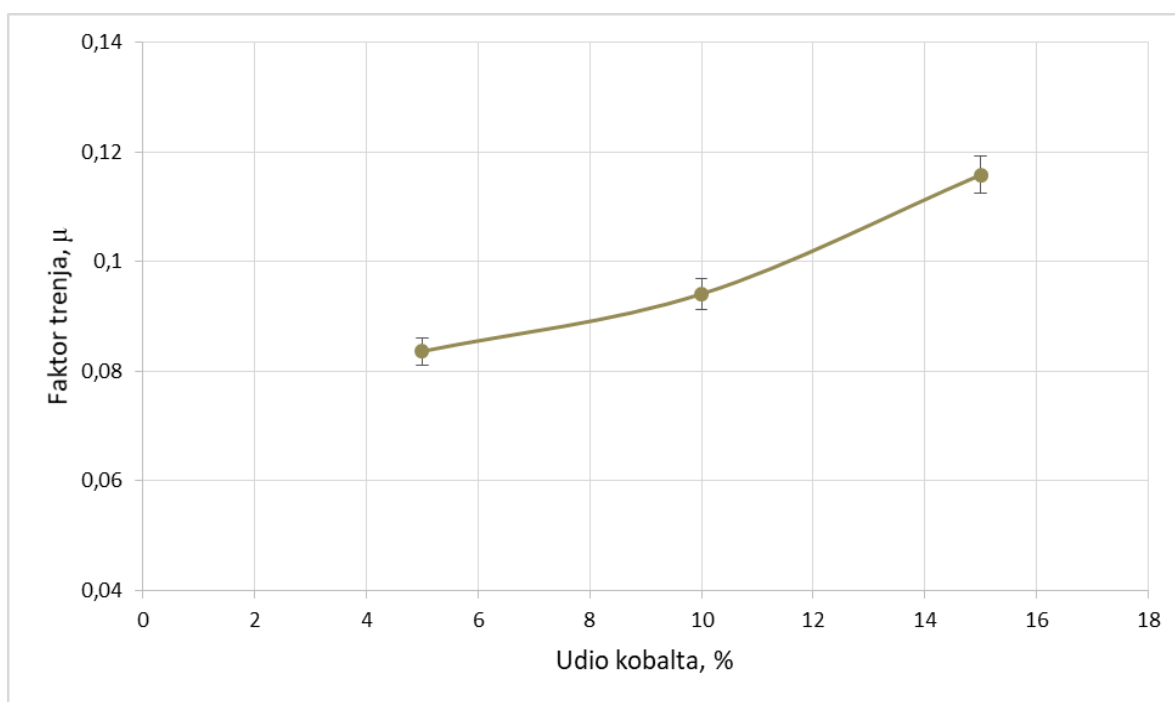
Slika 6.13. Usporedba faktora trenja za sva tri uzorka

Na slici 6.13. prikazana je usporedba faktora trenja kod sva tri ispitivana uzoraka (WC-5Co, WC-10Co i WC-15Co). Može se uočiti porast faktora trenja s povećanjem udjela kobalta. Faktori trenja za uzorak s 5% kobalta i 10% kobalta nakon pete sekunde imaju slične vrijednosti oko 0,08. Nakon toga koeficijent trenja za uzorak WC-10Co postepeno raste dosežući i nadmašujući vrijednost 0,1. Kod uzorka s 15% kobalta faktor trenja se stabilizira oko nešto više vrijednosti 0,12. Poslije dvadesete sekunde njegova vrijednost blago pada, ali svejedno ostaje veća nego kod uzoraka WC-5Co i WC-10Co.



Tablica 2. Srednja vrijednost, minimum, maksimum i standardno odstupanje faktora trenja

Uzorak	WC-5Co	WC-10Co	WC-15Co
Srednja vrijednost faktora trenja	0,08365	0,09410	0,11583
Minimalna vrijednost	0,06858	0,08360	0,10865
Maksimalna vrijednost	0,09362	0,10531	0,12701
Standardno odstupanje	0,00672	0,00564	0,00178



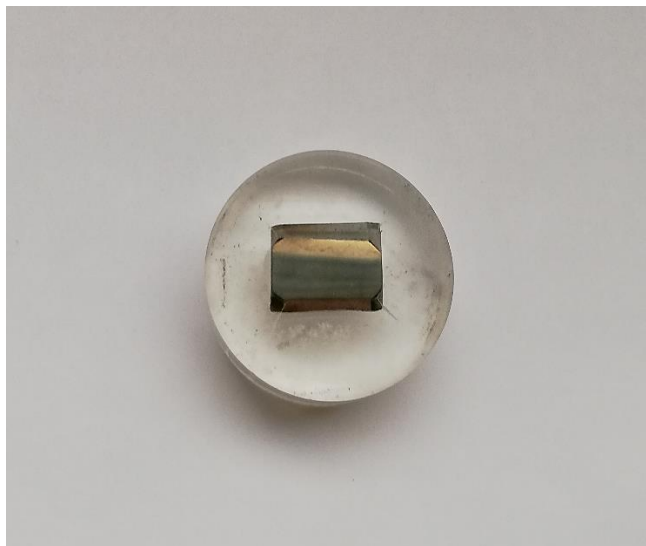
Slika 6.14. Ovisnost faktora trenja o udjelu kobalta

Podaci iz tablice 2 i dijagramskog prikaza na slici 6.14. pokazuju kako s povećanjem udjela kobalta rastu vrijednosti faktora trenja što znači da adhezijska otpornost tvrdog metala opada. S porastom udjela kobalta smanjuje se tvrdoća tvrdog metala te je u ovom slučaju ona proporcionalna adhezijskoj otpornosti.

Nakon provedenih ispitivanja, analizom na svjetlosnom mikroskopu, nisu pronađeni nikakvi vidljivi znakovi trošenja na uzorcima i ispitnim prstenima.

### 6.3. Metalografska priprema prstena

Za potrebe karakterizacije ispitnog prstena putem mjerenje tvrdoće izrezan je dio prstena i zaliven u polimernu masu, slika 6.15. Nakon toga pristupilo se metalografskoj pripremi koja se sastoji od brušenja i poliranja ispitne površine.



Slika 6.15. Uzorak prstena zaliven u polimernu masu

Faze metalografske pripreme površine jesu sljedeće:

1. brušenje površine brusnim papirom veličine zrna 320  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 1000  $\mu\text{m}$ , 2400  $\mu\text{m}$  i 4000  $\mu\text{m}$  uz vodeno hlađenje i podmazivanje pri brzini od 300 okr/min,
2. poliranje površine dijamantnom pastom veličine zrna 3  $\mu\text{m}$  uz hlađenje i podmazivanje lubrikantom pri brzina okretaja 150 okr/min,
3. poliranje površine SPM pastom veličine zrna 0,03  $\mu\text{m}$ , uz nepromjenjeno hlađenje i podmazivanje pri istoj brzini od 150 okr/min,

Tvrdoća prstena mjerena je na tvrdomjeru Indentec (slika 6.16.) primjenom opterećenja 1x 9,81 N (HV1). Na tvrdomjeru se nalazi stolić vezan za vreteno na koji se stavlja ispitni uzorak. Okretanjem tog vretena stolić se diže i tako približava uzorak vrhu indentora. Na tvrdomjeru se odabire željena metoda te se automatski, ovisno o odabranoj sili, stavljaju ili uklanjaju utezi. Operacija prodiranja indentora u površinu i njegovo uklanjanje je također automatizirano. Na

tvrdomjeru se nalazi i optički mjerni mikroskop te se na njemu odmah mogu očitati duljine dijagonala otiska i izmjerena tvrdoća.



Slika 6.16. Tvrdomjer Indentec

#### 6.4. Mjerenje tvrdoće prstena

Tvrdoća vanjskog prstena ležaja oznake 1R30X35X17 izmjerena je metodom HV1.. Napravljeno je 5 otisaka na uzorku prstena te su na svakom otisku izmjerene dijagonale  $d_1$  i  $d_2$ . Budući da je sila utiskivanja samo 9,81 N otisci su jako mali. Povećanje optičkog sustava tvrdomjera je premalo (100 puta) da bi se dijagonale mogle izmjeriti sa zadovoljavajućom točnošću te su stoga one mjerene pri povećanju od 1000 puta na optičkom mikroskopu spojenom na računalo (slika 6.17.).



Slika 6.17. Optički mikroskop

Iznosi tvrdoće dobiveni su jednadžbom:

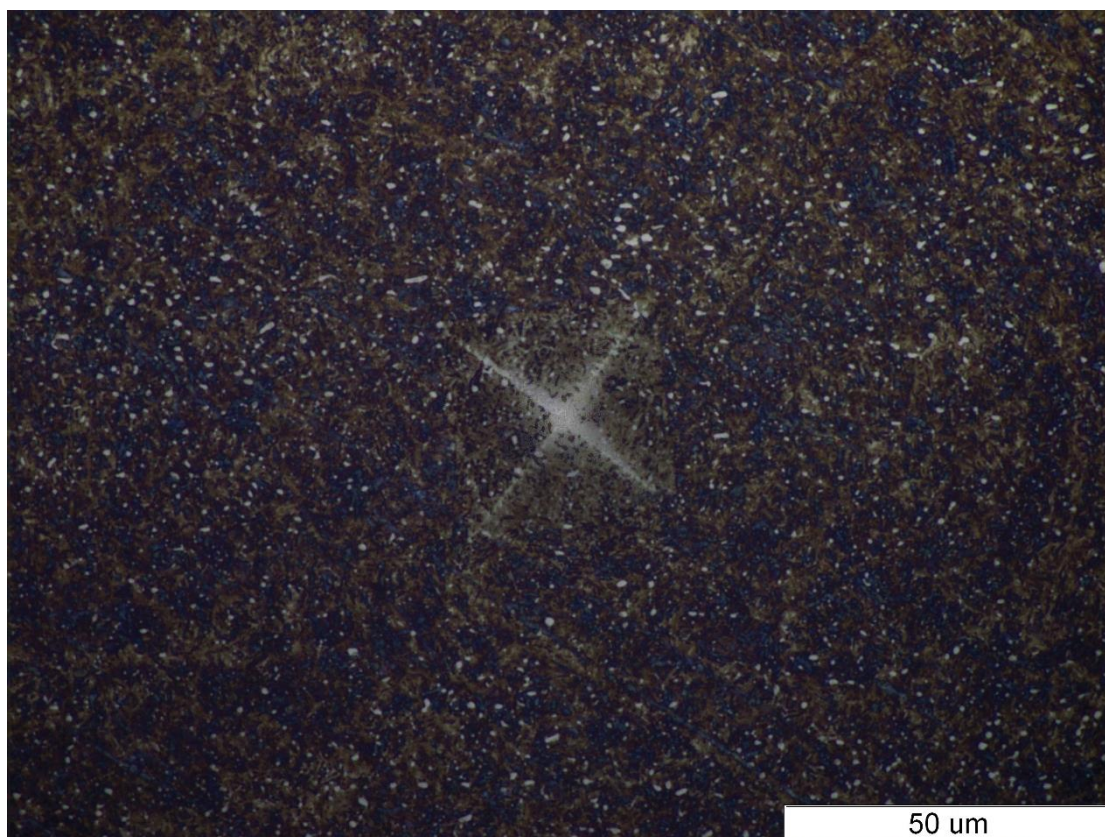
$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d_{sr}^2} \quad (5)$$

gdje je:

$d_{sr}$  – srednja vrijednost dijagonala otiska,  $d_{sr} = \frac{d_1 + d_2}{2}$  [mm],

$F$  – sila utiskivanja [N].

0,1891 – konstanta



Slika 6.18. Otisak piramide Vickersovog indentora

Na slici 6.18. prikazan je otisak napravljen na uzorku. Slika prikazuje otisak pri povećanju od 1000 puta koji ima oblik kvadrata odnosno to je baza šuplje piramide utisnute u materijalu. U tablici 3. prikazane su vrijednosti izmjerenih dijagonala, srednje vrijednosti tih dijagonala te izračunati iznosi tvrdoće.

Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće na prstenu

Broj otiska	$d_1$ , mm	$d_2$ , mm	$d_{sr}$ , mm	$F$ , N	HV1
1	0,0452	0,0457	0,0455	9,81	898
2	0,0459	0,0445	0,0452		908
3	0,0447	0,0453	0,0450		916
4	0,0456	0,0454	0,0455		896
5	0,0455	0,0451	0,0453		904
Srednja vrijednost	0,0454	0,0452	0,0453	9,81	904
Standardno odstupanje	0,0005	0,0005	0,0002	-	8,057

Ako usporedimo vrijednosti tvrdoće prstena iz tablice 3. s tvrdoćama tvrdog metala sa slike 3.1. očito je da su one znatno niže. Izračunata tvrdoća prstena je približno jednaka onoj sa specifikacija proizvođača. Na prstenu također nisu pronađeni nikakvi tragovi trošenja iako je njegova tvrdoća znatno niža od tvrdoće tvrdog metala. Razlog tome je kratko ispitivanje koje je trajalo 30 sekundi. Standardno odstupanje je malo što znači da je provedeno mjerenje tvrdoće kvalitetno i precizno.

## ZAKLJUČAK

Iz dobivenih rezultata otpornosti tvrdih metala WC-5Co (5% kobalta), WC-10Co (10% kobalta) i WC-15Co (15% kobalta) na adhezijsko trošenje može se zaključiti sljedeće:

- Adhezijska otpornost tvrdog metala se smanjuje s porastom udjela kobalta u tvrdom metalu. To proizlazi iz vrijednosti faktora trenja ispitanog na sva tri uzoraka. Faktori trenja su jako mali što govori kako su tvrdi metali uglavnom dobro otporni prema ovom mehanizmu trošenja što je vrlo važno kod njihove primjene kao reznih alata.
- Modernizirana metoda prizma po prstenu, uz korištenje računala i senzora, je kvalitetna i vrlo precizna jer se za 30 sekundi očitava 1500 podataka. Pomoću ove metode se mogu uočiti i najmanje razlike između faktora trenja zabilježene tijekom ispitivanja.
- Nakon ispitivanja, na uzorcima tvrdog metala kao i na ispitnim prstenima koji su u pravilu znatno niže tvrdoće od ispitanog tvrdog metala nisu pronađeni nikakvi vidljivi znakovi trošenja.

Za daljnja istraživanja preporuča se duže vrijeme trajanja ispitivanja radi mogućnosti naljepljivanja materijala tribosustava, primjena ispitnih prstena od drugih vrsta metala i legura kao i ispitivanje tvrdih metala različitog udjela karbidne faze koja ne mora nužno uključivati samo WC nego i ostale karbide koji mogu biti različite veličine zrna uz primjenu matrica kao što su niklene i željezne čime bi se proširila saznanja o sveukupnoj adhezijskoj otpornosti tvrdo-metalnih materijala.



## LITERATURA

- [1] <https://matmatch.com/suppliers/cera-cerazit/examples/cemented-tungsten-carbide-properties>, dostupno na dan 25.10.2019.
- [2] D. Ćorić, Posebni metalni materijali – III dio, Fakultetski udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3] Aleksandrov – Fabijanić, T., Razvoj referentnih pločica tvrdoće po Vickersu postupkom metalurgije praha, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [4] Kríž A., Bricín D., Properties and Testing of Cemented Carbides, Powder Metallurgy - Fundamentals and Case Studies, 2017.
- [5] <https://www.mpif.org/IntrotoPM/MakingMetalPowder.aspx>, dostupno na dan 25.10.2019.
- [6] <https://www.pm-review.com/introduction-to-powder-metallurgy/mixing-powders-for-pm-processing/>, dostupno na dan 25.10.2019.
- [7] A. J. Lynch, Chester A. Rowland, The History of Grinding, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, Colorado
- [8] Ghader Faraji, H.S. Kim Hessam, Torabzadeh Kashi, Severe Plastic Deformation - Methods, Processing and Properties, Elsevier, 2018.
- [9] <https://www.globalspec.com/reference/73396/203279/chapter-5-metal-powder-compaction> dostupno na dan 25.10.2019.
- [10] Dmitri Kopeliovich, Methods of shape forming ceramic powders, SubsTech, Substances and Technologies, 2012.
- [11] Ajay P. D., Ramesh S. Rao., Dr. Rangaswamy T., Rengarajan R., Khilendra K., Paniraj S., Near net pressing of WC based hardmetal compacts in Cold Iso-static Pressing, International Journal of Scientific and Engineering Research, Volume 8, Issue 1, 2017.
- [12] <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/cold-isostatic-pressing>, dostupno na dan 25.10.2019.
- [13] C. H. Allibert, Sintering features of cemented carbides WC-Co processe from fine powders, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 19, 2001.
- [14] A.G.P. da Silva, W.D. Schubert, B. Lux, The Role of the Binder Phase in the WC-Co Sintering, Materials Research, vol.4, no.2, 2001.
- [15] Jakob Kübarsepp, Technology of full density powder materials and products, Institute of Materials Engineering, Presentation of lectures, Tallinn University of Technology



- [16] Sandvik Hard Materials, Understanding Cemented Carbide
- [17] Today's Machining World, Vol. 2, Issue 10, 2006.
- [18] <https://www.mmsonline.com/products/double-sided-shoulder-mills-achieve-high-surface-quality>, dostupno na dan 25.10.2019.
- [19] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5b/Inserti\\_widia.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5b/Inserti_widia.jpg), dostupno na dan 25.10.2019.
- [20] Anderson C.A. de Melo, Júlio César G. Milan, Márcio B. da Silva, Álisson R. Machado, Some observations on wear and damages in cemented carbide tools, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol.28 no.3, 2006.
- [21] Jüri Pirso, Sergei Letunoviš, Mart Viljus, Friction and wear behaviour of cemented carbides, Wear 257 (3-4), 2004.
- [22] Proizvodno inženjerstvo, Trošenje i postojanost oštrice alata, Predavanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [23] C. Zhang, Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites, China, Advances in Ceramic Matrix Composites, 2014.
- [24] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms\\_of\\_wear](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear), dostupno na dan 25.10.2019.
- [25] Milton Keynes, The Open University (UK), T881 Manufacture Materials Design: Block 2: Cutting, page 14., 2001.
- [26] <https://blog.miragemachines.com/metal-machining-insight-avoiding-built-up-edge>, dostupno na dan 25.10.2019.
- [27] S. Ndlovu, The Wear Properties of Tungsten Carbide-Cobalt Hardmetals from the Nanoscale up to the Macroscopic Scale, Doctoral thesis, Der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg zur Erlangung des Grades, 2009.
- [28] A. Formisano, F. Capece Minutolo, A. Caraviello, L. Carrino, M. Durante, and A. Langella, Influence of Eta-Phase on Wear Behavior of WC-Co Carbides, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Tribology, Volume 2016.
- [29] V. Kovačević: Inženjerstvo površina, Predavanje, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2013.
- [30] K. Jia, T.E. Fischer, Abrasion resistance of nanostructured and conventional cemented carbides, Wear 200 (1-2), 1996.
- [31] Gee, M. G., Gant, A., & Roebuck, B., Wear mechanisms in abrasion and erosion of WC/Co and related hardmetals, Wear 263 (1-6), 2007.

- [32] Llanes, L., Anglada, M., & Torres, Y., Fatigue of Cemented Carbides. Comprehensive Hard Materials, Elsevier, 2014.
- [33] Li, A., Zhao, J., Wang, D., Gao, X., & Tang, H., Three-point bending fatigue behavior of WC–Co cemented carbides, Materials & Design, Elsevier, 2013.
- [34] Liyong Chen, Danqing Yi, Bin Wang, Huiqun Liu, Chunping Wu, Xiang Huang, Huihui Li, Yuehong Gao, The selective oxidation behaviour of WC–Co cemented carbides during the early oxidation stage, Corrosion Science, Elsevier, 2015.
- [35] Shao Fang, Liu Zhanqiang, Wan Yi1, Thermodynamics Analysis of Oxidation Wear Behavior of Cemented Carbide Tools in High Speed Machining, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2009.
- [36] Christophe Ramirez, Andi Idhil Ismail, Christine Gendarme, Moukrane Dehmas, Elisabeth Aeby-Gautier, Gérard Poulachon, Frédéric Rossi, Understanding the diffusion wear mechanisms of WC-10%Co carbide tools during dry machining of titanium alloys, Wear, vol. 390-391, 2017.
- [37] Z. Dadić, Tribološki principi i mjere za smanjenje trošenja alata kod obrade odvajanjem čestica, International conference “Mechanical Technologies and Structural Materials”, Split, 2013.
- [38] K. Grilec, S. Jakovljević, G. Marić: Tribologija u strojarstvu, Sveučilišni udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [39] <https://extremecoatings.net/technical-resources/test-results/adhesive-wear-test-astm-g77/>, dostupno na dan 25.10.2019.
- [40] [https://www.researchgate.net/figure/A-friction-knot-of-the-four-ball-tester-ChMT-1-prescribed-speed-1460-rpm\\_fig2\\_262828698](https://www.researchgate.net/figure/A-friction-knot-of-the-four-ball-tester-ChMT-1-prescribed-speed-1460-rpm_fig2_262828698), dostupno na dan 25.10.2019.
- [41] <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>, dostupno na dan 25.10.2019.
- [42] <http://nanrasatapor.zapto.org/pin-on-disc-machine-thesis-dcf>, dostupno na dan 25.10.2019.
- [43] [https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-ball-on-flat-reciprocating-friction-test\\_fig5\\_317262574](https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-ball-on-flat-reciprocating-friction-test_fig5_317262574), dostupno na dan 25.10.2019.

## **PRILOZI**

1. CD-R Disc